



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Departament d'Enginyeria Electrònica

Array Sísmico inalámbrico y de parámetros ambientales para la caracterización de precursores de actividad volcánica

Tesis doctoral presentada para la obtención del título de Doctor por la Universitat Politècnica de Catalunya, dentro del programa de doctorado en Ingeniería Electrónica

David Moure García

Director:

Joaquín del Río Fernández

Codirector:

Daniel Toma/María José Blanco

Julio de 2017



Curso académico: 2016-2017

Acta de calificación de tesis doctoral

Nombre y apellidos

Ángel David Moure García

Programa de doctorado

Ingeniería Electrónica

Unidad estructural responsable del programa

Departamento de Ingeniería Electrónica

Resolución del Tribunal

Reunido el Tribunal designado a tal efecto, el doctorando / la doctoranda expone el tema de la su tesis doctoral titulada **Array Sísmico inalámbrico y de parámetros ambientales para la caracterización de precursores de actividad volcánica**.

Acabada la lectura y después de dar respuesta a las cuestiones formuladas por los miembros titulares del tribunal, éste otorga la calificación:

☐

NO APTO

☐

APROBADO

☐

NOTABLE

☐

SOBRESALIENTE

(Nombre, apellidos y firma)		(Nombre, apellidos y firma)	
Presidente/a		Secretario/a	
(Nombre, apellidos y firma)	(Nombre, apellidos y firma)	(Nombre, apellidos y firma)	(Nombre, apellidos y firma)
Vocal	Vocal	Vocal	Vocal

_____, ____ de _____ de _____

El resultado del escrutinio de los votos emitidos por los miembros titulares del tribunal, efectuado por la Escuela de Doctorado, a instancia de la Comisión de Doctorado de la UPC, otorga la MENCIÓN CUM LAUDE:

☐í☐o

(Nombre, apellidos y firma)	(Nombre, apellidos y firma)
Presidente de la Comisión Permanente de la Escuela de Doctorado	Secretario de la Comisión Permanente de la Escuela de Doctorado

Barcelona a ____ de _____ de _____

Resumen

La actividad sísmica a nivel global está ampliamente estudiada y queda bien caracterizada mediante las redes de sismómetros enfocadas al riesgo sísmico derivado de los terremotos. Sin embargo, el estudio específico de la sismicidad volcánica está poco extendido, debido a la gran variedad de señales volcánicas y a los largos periodos de inactividad que pueden presentar los volcanes. A pesar de que la tecnología de arrays sísmicos (antenas sísmicas) surgió para la vigilancia de explosiones nucleares, pronto se convirtió en una herramienta de gran utilidad en el análisis y localización de señales volcánicas gracias a su gran variedad de técnicas de procesado. La diferencia principal entre un array y una red de sismómetros, se encuentra en las diversas técnicas de análisis aplicadas a las señales sísmicas registradas por los sismómetros individualmente y en su conjunto. De las distintas técnicas que se utilizan en el procesado de arrays sísmicos se ha escogido la de formación del haz (beamforming). En los arrays sísmicos actuales, las señales analógicas procedentes de cada sensor son llevadas por cable hasta el sistema de adquisición central, con la consiguiente merma en la calidad de la señal procesada. El nodo central debe realizar la adquisición de la señal de todos los sensores, establecer un control del tiempo mediante el uso de un GPS, almacenar los datos, transmitirlos, etc. A esto hay que añadir la posibilidad de que los equipos de monitorización volcánica sean destruidos, o que se agote la fuente de energía, por tanto se hace evidente la necesidad de disponer de equipos de muy bajo coste y gran autonomía, que actualmente no existen.

Siguiendo esta línea de trabajo se ha diseñado una antena sísmica formada por redes de sensores inalámbricos que permitirá establecer cualquier topología de array, eliminando la necesidad de interconexión mediante cables. Esto representará un avance significativo respecto a los dispositivos existentes, tanto por la reducción de costes que implica, como por la autonomía que se consigue, lo cual permite un despliegue rápido sin necesidad de realizar una gran inversión económica. Estos equipos presentan una gran versatilidad, gracias al uso de las últimas tecnologías tanto en hardware como en software, utilizando un sistema abierto de tipo Linux embebido donde todo el software utilizado es libre. Esto permite configurar y visualizar los datos que se están registrando en tiempo real, a través de una página web y de una aplicación de mensajería instantánea, con el fin de poder realizar un seguimiento de la actividad en cualquier parte e instante.

Las técnicas de localización con array se basan en la búsqueda de la máxima coherencia de las señales registradas por los distintos sensores del array, mejorando la calidad de la señal sísmica mediante la suma de la señal de cada elemento de forma coherente. Esto implica que la parte más importante en la adquisición de datos sea obtener los retardos de cada señal de forma exacta. Pruebas sintéticas muestran que un milisegundo de retardo de sincronismo deriva en un error en la determinación del ángulo de llegada por debajo de un grado. Para aumentar la precisión de sincronización de tiempo, se ha experimentado en el laboratorio con el estándar IEEE 1588 PTP

empleando módulos comerciales inalámbricos Xbee PRO, consiguiendo sincronización del orden del microsegundo, superiores a los requisitos del análisis de datos de array. El resultado final del trabajo de tesis ha permitido la realización de un equipo de adquisición sísmica compacto de bajo consumo (515,24mW) y coste (inferior al 10% sistemas comerciales), inalámbrico, de bajo ruido (2 bits en A/D de 24) y ligero, facilitando la posibilidad de disponer de un número significativo de unidades. El equipo ha sido validado en el laboratorio mediante sistemas de medida automatizados y procedimientos de calibración. Además se ha probado en diferentes campañas comparando el array sísmico inalámbrico desarrollado con un array de referencia cableado del IGN, ambos utilizando sensores sísmicos MARK L4 de 1 componente (vertical) y 1 segundo, siendo la relación señal/ruido de ambos equipos idéntica. Atendiendo a la tolerancia del reloj de los A/D de las diferentes estaciones del array, se ha verificado que en el peor de los casos el error de sincronismo es de 650 μ s.

Palabras clave: monitorización volcánica, adquisición sísmica, array sísmico, sincronización, Linux, PTP.

Abstract

The global seismic activity is extensively studied and well characterized by seismic networks focused on the seismic hazards derived from earthquakes. However, a specific study on volcano seismicity is not widespread, due to the wide variety of volcanic signals as well as the long periods of quiescence of many volcanoes. Seismic array technology emerged as a method for nuclear tests monitoring, however, it soon became an important tool for the analysis and location of volcano seismic signals thanks to a wide variety of processing techniques. From the techniques applied in array processing, in this PhD Thesis the beamforming algorithm has been chosen. In classical seismic arrays, the analog signals from each sensor are wired transmitted to the central acquisition system, resulting in a decrease of quality of the processed signal. Central node must perform signal acquisition from all sensors, establish a time control through the use of a GPS, store data and transmit them. Moreover, the volcanic monitoring equipment could be destroyed, or have depleted its power source, thus, it becomes evident the need of very low cost and high autonomy equipments, which currently do not exist.

In this way, a seismic array has been designed, consisting of a wireless seismic network that allows any array topology, removing the need of any wire connection. It is a significant step forward over existing devices, due to involved cost reduction and autonomy obtained, that allow fast deployment without the need of large investments. These equipments present high versatility, thanks to the use of the latest technologies in both hardware and software, using an open source operating system with embedded Linux where all software is free. This allows us to configure and display recorded data on real time, through a webpage and an instant messaging application, in order to be able to track the activity at any moment and from everywhere.

Array localization techniques are based on the search for the maximum coherence of the recorded signals by each sensor of the array, improving the quality of the seismic signal by coherently adding the signal of each element. This implies that the most important part in the data acquisition is to obtain the time delay of each signal accurately. Synthetic tests show that a delay in the synchronism of one millisecond implies an error of less than one degree in determining the arrival angle. In order to increase the accuracy of time synchronization, it has been experimented in the laboratory with the IEEE 1588 PTP standard, using Xbee PRO commercial wireless modules, achieving synchronization of the order of microseconds, well above the data analysis requirements. The final result of this Thesis has allowed the development of a compact seismic acquisition system with low-power consumption (515,24 mW), low cost (at least 10% below average commercial systems), low-noise (2-bit A/D 24) and lightweight, making easier the possibility to develop a significant number of these devices. The equipment has been checked in the laboratory through automated measurement systems and calibration procedures. It has been also tested in different field campaigns where

wireless seismic array was compared to a wired array of the IGN (as a reference), both using the MARK L4 seismic sensor (vertical component, and 1second natural period), being the signal-to-noise ratio of both equipment identical. Taking into account the tolerance of the A/D clock of the different stations in the array, it has been verified that in the worst case the synchronization error was 650 μ s.

Keywords: Volcano monitoring, seismic acquisition, seismic array, synchronization, Linux, PTP.

Agradecimientos

La investigación que he llevado a cabo en este trabajo de Tesis ha sido enormemente gratificante, en gran medida por la interacción que he mantenido con mis supervisores, compañeros y amigos.

Quería agradecer en primer lugar a todos los compañeros que forman parte del grupo de vigilancia volcánica del Instituto Geográfico Nacional, que me han ayudado de alguna manera a terminar este trabajo de tesis. Especialmente a mi gran amigo Pedro Torres, que sin su inestimable ayuda no lo hubiera conseguido. También quería agradecer especialmente a Itahiza, Eduardo y Rafa por dedicarme su tiempo y compartir conmigo sus conocimientos.

En segundo lugar mi más sincero agradecimiento a mis directores y codirectores de tesis. En especial a María José Blanco, directora el Centro Geofísico de Canarias, que me ha proporcionado todo cuanto necesitaba para llegar hasta aquí. También, por el gran esfuerzo que ha realizado, a mi antiguo director de Tesis, Antoni Mànuel, le estaré eternamente agradecido porque más allá de su vida profesional, sin su constante impulso esta Tesis no se habría completado. A mi actual director y codirector, Joaquín del Río y Daniel Toma, su grupo de investigación SARTI de la UPC por acogerme y compartir su conocimiento e infraestructuras.

Al Instituto Geográfico Nacional en el que trabajo en instrumentación volcánica, porque ha posibilitado mi desarrollo profesional en este ámbito apasionante.

Al INGV-Palermo por acogerme y confirmarme que la instrumentación comercial no siempre es adecuada para la vigilancia volcánica y hay que adaptarla o incluso desarrollarla.

A Vicente Soler, por introducirme en el mundo de la volcanología y contagiarme su pasión por la instrumentación.

Gracias también a mi familia, por su comprensión y apoyo en mis estudios e intereses peculiares.

Finalmente quisiera agradecer a mi maravillosa mujer, Elena, que siempre me ha alentado en los momentos más difíciles.

Gracias.

Contenido

RESUMEN	V
ABSTRACT	VII
AGRADECIMIENTOS	IX
LISTA DE FIGURAS	XV
LISTA DE TABLAS	XVII
ACRÓNIMOS	XIX
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS	2
1.2 OBJETIVOS	4
1.3 SINCRONIZACIÓN EN REDES DE SENSORES SÍSMICOS.	4
1.4 REALIZACIÓN DE EQUIPOS DE ADQUISICIÓN SÍSMICA INALÁMBRICOS	4
1.5 ARRAY SÍSMICO, PRESENTACIÓN Y PROCESADO DE LA SEÑAL SÍSMICA	5
1.6 ESTRUCTURA DE LA TESIS	6
CAPÍTULO 2. MONITORIZACIÓN VOLCÁNICA	7
2.1 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE MONITORIZACIÓN VOLCÁNICA	7
2.2 SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS SÍSMICOS	11
2.3 SEÑALES VOLCÁNICAS	12
2.4 INTRODUCCIÓN A LOS ARRAYS SÍSMICOS	14
2.5 SINCRONIZACIÓN EN REDES DE SENSORES	21
2.5.1 REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS	21
2.5.2 IMPRECISIÓN DEL RELOJ	24
2.5.3 MÉTODOS DE SINCRONISMO	26
2.5.4 ANTECEDENTES DE REDES DE SENSORES SÍSMICOS	30
CAPÍTULO 3. SISTEMA DE ADQUISICIÓN MULTIPARAMÉTRICOS PARA MONITORIZACIÓN VOLCÁNICA	33
3.1 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE BAJO COSTE CON LINUX EMBEBIDO. PRIMER DESARROLLO	34

3.1.1	EQUIPAMIENTO: CONTROLADORA Y SENSORES	34
3.1.2	ENTORNO DE PROGRAMACIÓN	37
3.2	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE BAJO COSTE CON LINUX EMBEBIDO. ROBUSTEZ DEL SISTEMA	46
3.3	VALORACIÓN DEL SISTEMA DE MEDIDA DESARROLLADO	50
CAPÍTULO 4. ARRAY INALÁMBRICO PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS SÍSMICOS		51
4.1	DISEÑO DE UNA ESTACIÓN DE ADQUISICIÓN DE DATOS DEL ARRAY SÍSMICO	53
4.2	FUNCIONAMIENTO DE UNA ESTACIÓN DE ADQUISICIÓN DE DATOS DEL ARRAY SÍSMICO	56
4.2.1	CONTROL DEL TAMAÑO DEL BUFFER DE DATOS	58
4.2.2	ACTIVACIÓN DE LA SEÑAL DE SINCRONIZACIÓN	59
4.2.3	ADQUISICIÓN DEL DATO	59
4.2.4	INTERRUPCIÓN DE DMA	60
4.2.5	PROGRAMA PRINCIPAL	61
4.3	FORMATO DE LOS DATOS	62
4.4	VALORACIÓN DEL SISTEMA DE MEDIDA DESARROLLADO	65
4.5	EVOLUCIÓN DEL DISEÑO DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN	65
CAPÍTULO 5. CARACTERIZACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS SISTEMAS DE ADQUISICIÓN PARA MONITORIZACIÓN VOLCÁNICA		67
5.1	SISTEMA ADQUISICIÓN EMPLEANDO LINUX EMBEBIDO	68
5.1.1	CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA	74
5.2	SISTEMA ADQUISICIÓN EMPLEANDO LINUX EMBEBIDO Y MICROCONTROLADOR	75
5.2.1	CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA	78
5.3	SISTEMA DE ADQUISICIÓN EMPLEANDO MICROCONTROLADOR Y CONVERTIDOR AD7193	79
5.4	VALIDACIÓN EN CAMPO DE UNA ESTACIÓN SÍSMICA	86
5.5	VALIDACIÓN EN CAMPO DEL ARRAY SÍSMICO	91
5.6	CARACTERÍSTICAS DEL SISMÓMETRO DEL ARRAY DISEÑADO	95
5.6.1	PRUEBAS DE COMUNICACIÓN	95
5.6.2	PRUEBAS DE CONSUMO	99
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES		103
6.1	APORTACIONES	104
6.2	FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO	109
CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA		111

7.1	PUBLICACIONES DERIVADAS DEL TRABAJO DE TESIS	111
7.1.1	REVISTAS	111
7.1.2	CONGRESOS	112
7.2	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114
<u>ANEXO A.</u>	<u>COMPONENTES</u>	<u>123</u>
<u>ANEXO B.</u>	<u>ESQUEMÁTICOS</u>	<u>126</u>

Lista de figuras

Figura 1.1. <i>Esquema del procedimiento de localización sísmica con varias estaciones</i>	2
Figura 2.1. <i>Esquema del desplazamiento de las ondas internas y superficiales</i>	13
Figura 2.2. <i>Señales típicas de ambientes volcánicos.</i>	14
Figura 2.3. <i>Frente de onda plano atravesando un array sísmico</i>	19
Figura 2.4. <i>Técnica de beam-forming aplicada a un array de 23 elementos</i>	20
Figura 2.5. <i>Comparativa de tecnologías inalámbricas</i>	23
Figura 2.6. <i>Modelo de reloj de los nodos sensor con respecto al reloj ideal</i>	25
Figura 2.7. <i>Intercambio básico de mensajes de sincronización [IEEE 1588-2008]</i>	29
Figura 3.1. <i>Esquema general del sistema de adquisición</i>	35
Figura 3.2. <i>Diagrama de flujo de la aplicación main.c</i>	38
Figura 3.3. <i>Diagrama de flujo del script graph.sh</i>	39
Figura 3.4. <i>Sección de la página web correspondiente a la medida del gravímetro y control de la batería.</i>	40
Figura 3.5. <i>Sección de la página web correspondiente a los datos meteorológicos del equipo de gravimetría.</i>	41
Figura 3.6. <i>Sección de la página web donde se muestra la configuración.</i>	41
Figura 3.7. <i>Consulta del estado de las distintas estaciones, en tiempo real.</i>	43
Figura 3.8. <i>Sección de la página web del sistema de monitorización visual.</i>	45
Figura 3.9. <i>Consulta del estado de las distintas estaciones a través del software de mensajería.</i>	46
Figura 3.10. <i>Esquema general del sistema de adquisición con microcontrolador</i>	47
Figura 3.11. <i>Sistema de 24 bits, 5 canales y tarjeta SD</i>	48
Figura 3.12. <i>Breve resumen de la configuración del equipo a través de un terminal.</i>	49
Figura 3.13. <i>Ejemplo de terminal de configuración del sistema de adquisición.</i>	49
Figura 4.1. <i>Error cometido en el cálculo de los ángulos de llegada y lentitudes.</i>	52
Figura 4.2. <i>Sistema de adquisición con el nuevo conversor A/D AD7193.</i>	54
Figura 4.3. <i>Relación entre las distintas señales que disparan la adquisición.</i>	55
Figura 4.4. <i>Diagrama de funcionamiento general del sistema de adquisición para sísmica.</i>	56
Figura 4.5. <i>Diagrama de funcionamiento de la interrupción de PPS</i>	58
Figura 4.6. <i>Diagrama de funcionamiento del vector de interrupción por recepción de señal DRDY</i>	59
Figura 4.7. <i>Diagrama de funcionamiento del vector de interrupción de la DMA.</i>	60
Figura 4.8. <i>Diagrama de funcionamiento del programa principal que se ejecuta en un bucle infinito.</i>	61
Figura 4.9. <i>Cabecera utilizada en las estaciones que conforman el array sísmico.</i>	63
Figura 5.1. <i>Localización de los distintos sistemas de monitorización volcánica.</i>	68
Figura 5.2. <i>Sistema de adquisición con Linux embebido.</i>	69
Figura 5.3. <i>Gráficas de los datos registrados por el sistema de adquisición con Linux embebido.</i>	69
Figura 5.4. <i>Sistema de adquisición con Linux embebido..</i>	70

Figura 5.5. <i>Representación de 15 días de registro en El Hierro de la estación ITIG (galería Tigirote).</i>	71
Figura 5.6. <i>Comparativa del registro de un sensor de deformación con el sistema desarrollado.</i>	72
Figura 5.7. <i>Registro de 30 días de la marea oceánica con un sistema de adquisición comercial.</i>	73
Figura 5.8. <i>Sistema de monitorización de imágenes.</i>	74
Figura 5.9. <i>Representación del voltaje de una pila de tipo AA durante 20 minutos.</i>	76
Figura 5.10. <i>Temperatura registrada a 10, 30, 50 y 70 cm de profundidad en mayo de 2016 (1-15).</i>	77
Figura 5.11. <i>Datos meteorológicos.</i>	78
Figura 5.12. <i>Representación de la medida de un voltaje de 150 mV</i>	79
Figura 5.13. <i>Voltaje registrado con distintas configuraciones del conversor A/D al medir una señal de 180 mV.</i>	80
Figura 5.14. <i>Representación gráfica del tiempo de estabilización de tres estaciones</i>	81
Figura 5.15. <i>Diagrama del test realizado para verificar el sincronismo de los equipos</i>	83
Figura 5.16. <i>Resultado del test del PPS generado por un cuarto GPS.</i>	84
Figura 5.17. <i>Voltaje de 150 mV medido por el sistema desarrollado.</i>	85
Figura 5.18. <i>Estación sísmica desarrollada.</i>	86
Figura 5.19. <i>Localización del array sísmico del IGN.</i>	86
Figura 5.20. <i>Localización de los sistemas desarrollados.</i>	87
Figura 5.21. <i>Registro en ST02 de uno de los sismos registrados en las tres estaciones desarrolladas.</i>	88
Figura 5.22. <i>Comparativa del registro del array cableado y uno de los equipos desarrollados.</i>	89
Figura 5.23. <i>Comparativa del espectro de una señal de un minuto de duración</i>	89
Figura 5.24. <i>Representación de la señal registrada en cada estación.</i>	91
Figura 5.25. <i>Representación de sismos localizados por la Red Sísmica Nacional del IGN.</i>	93
Figura 5.26. <i>Dirección de llegada de las ondas de los eventos sísmicos.</i>	94
Figura 5.27. <i>Pruebas de comunicaciones con los módulos de DIGI.</i>	96
Figura 5.28. <i>Test de recepción de datos.</i>	97
Figura 5.29. <i>Configuración de las mediciones del sincronismo en la topología en estrella</i>	98
Figura 5.30. <i>Derivas entre los diferentes relojes corriendo libremente.</i>	98
Figura 5.31. <i>Imagen de una de las estaciones instalada con un panel de 10 W y una batería de 12V y 12 Ah.</i>	102
Figura B.1. <i>Esquemático del sistema acondicionador de señal del sensor sísmico</i>	126
Figura B.2. <i>PCB del sistema acondicionador de señal del sensor sísmico</i>	126

Lista de tablas

Tabla 2.1. <i>Gravímetros utilizados en monitorización volcánica</i>	9
Tabla 2.2. <i>Inclinómetros de alta precisión</i>	9
Tabla 2.3. <i>Sensores utilizados en la medida de mareas.</i>	10
Tabla 2.4. <i>Algunos sensores sísmicos utilizados en vigilancia volcánica</i>	10
Tabla 3.1. <i>Software del sistema de adquisición de datos.</i>	38
Tabla 3.2. <i>Algunos de los comandos admitidos por los distintos equipos</i>	42
Tabla 3.3. <i>Software del sistema de monitorización por imágenes</i>	43
Tabla 4.1. <i>Descripción de los campos del mensaje ZDA</i>	57
Tabla 4.2. <i>Descripción de los campos del mensaje GGA</i>	57
Tabla 4.3. <i>Resumen de la evolución de los distintos desarrollos</i>	66
Tabla 5.1. <i>Comparativa de ruido entre el sistema comercial CR800 y el sistema desarrollado</i>	72
Tabla 5.2. <i>Consumo del sistema de adquisición con Linux embebido.</i>	74
Tabla 5.3. <i>Datalogger comerciales vs datalogger diseñado</i>	75
Tabla 5.4. <i>Estadística de los datos obtenidos.</i>	76
Tabla 5.5. <i>Características de la salida de voltaje del calibrador ISO-TECH ILC-421</i>	77
Tabla 5.6. <i>Consumo del dispositivo en sus posibles estados</i>	78
Tabla 5.7. <i>Estadística de los datos obtenidos.</i>	80
Tabla 5.8. <i>Estadísticas de los valores obtenidos.</i>	81
Tabla 5.9. <i>Sincronismo que mantendrían distintos conversores</i>	82
Tabla 5.10. <i>Propiedades del cristal de cuarzo del microcontrolador</i>	83
Tabla 5.11. <i>Estadísticas del ruido medido</i>	85
Tabla 5.12. <i>Relación señal ruido calculada para el evento estudiado. En azul las estaciones construidas.</i>	90
Tabla 5.13. <i>Errores en el azimut calculado mediante el array de tres componentes.</i>	93
Tabla 5.14. <i>Comparativa del tiempo de cálculo del algoritmo de beam-forming.</i>	95
Tabla 5.15. <i>Módulos testeados para su uso como transmisores del array sísmico inalámbrico.</i>	95
Tabla 5.16. <i>Comparativa entre microcontroladores</i>	100
Tabla 5.17. <i>Comparativa de convertidores analógico/digital</i>	100
Tabla 5.18. <i>Comparativa de GPSDO. GPS con salida de reloj disciplinado.</i>	100
Tabla 5.19. <i>Detalles de consumo total de una estación sísmica y sus elementos</i>	101
Tabla 5.20. <i>Cálculo del número de paneles y capacidad de la batería.</i>	102
Tabla A.1. <i>Características generales Raspberry Pi</i>	123
Tabla A.2. <i>Características del gravímetro LaCoste & Romberg, Modelo G</i>	123
Tabla A.3. <i>Componentes principales de la estación meteorológica</i>	123
Tabla A.4. <i>Especificaciones de los sensores de humedad y presión</i>	124

Tabla A.5. <i>Especificaciones del inclinómetro de plataforma 701-2 de Jewell Instruments</i>	124
Tabla A.6. <i>Características generales del radar SEBAPuls 30</i>	124
Tabla A.7. <i>Especificaciones de la cámara para Raspberry Pi</i>	124
Tabla A.8. <i>Características principales del receptor gps U-blox NEO-M8T</i>	125
Tabla A.9. <i>Características principales del sensor sísmico</i>	125

Acrónimos

ADC	Analog-Digital converter
CSV	Comma Separated Values
<i>HDLC</i>	High-Level Data Link Control
MAC	Medium Access Control
MSB	Most significant bit
NMEA	National Marine Electronics Association
NTP	Network Time Protocol
PHP	Hypertext Preprocessor
PPS	Pulse Per Second
PTP	Precision Time Protocol
TDMA	Time Division Multiple Access
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
UDP	User Datagram Protocol
UTC	Universal Time Coordinated
WSN	Wireless Sensor Network

Capítulo 1

Introducción

La historia de la vigilancia volcánica instrumental comienza con la instalación de sismógrafos mecánicos que permitían la detección de la actividad sísmica que suele preceder a la manifestación volcánica en superficie, esto es, a la erupción.

En sus inicios, los sismómetros se usaban para la caracterización del movimiento del suelo y conteo de eventos sísmicos, ya que se trataba de elementos mecánicos que trazaban sobre un papel la vibración recogida de éste. El avance de la tecnología ha permitido dar un paso más en el uso de los sismómetros, permitiendo que sean capaces, cuando forman una red, de permitir la localización espacio-temporal del terremoto y no solo obtener un registro local de éste.

Para poder conocer el origen de la vibración que se registra en los sismómetros en superficie, se instalan redes sísmicas, que están formadas por varias estaciones sísmicas, con una base temporal común. En cada estación se lee el instante de llegada de las diferentes ondas sísmicas (fases) a las distintas estaciones que conforman la red. Conociendo con precisión el tiempo en el que cada onda llega al sensor y asumiendo un modelo de velocidad de propagación de las ondas sísmicas, se puede realizar un cálculo de la distancia entre la estación y el origen de la señal sísmica. El resultado es el radio de la circunferencia en torno al sensor, que representa la distancia sensor-fuente sísmica. Si se repite este cálculo en el resto de las estaciones de la red, se puede calcular el punto donde se originó la señal (Figura 1.1). La puesta en funcionamiento de constelaciones de satélites de posicionamiento global ha permitido mejorar la precisión de las localizaciones de los eventos sísmicos, al dotar a los sismómetros de una base temporal de referencia precisa.

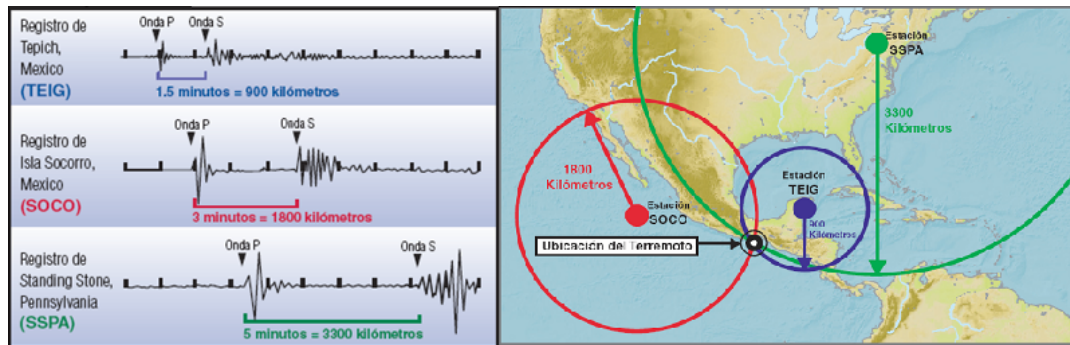


Figura 1.1. Esquema del procedimiento de localización sísmica con varias estaciones

1.1 Justificación de la tesis

Realmente con una red sísmica, tratada como se ha introducido en el apartado anterior, no se pueden localizar movimientos del suelo que no tengan fases con instantes de llegada. En la Figura 1.1 se pueden observar las fases P y S (apartado 2.3) de un mismo terremoto, registrado por distintas estaciones sísmicas. Otro tipo de señales que carecen de fases, como algunas volcánicas, cuyo origen es diverso y no siempre obedece a una rotura de material, no pueden ser localizadas por redes como las presentadas en la Figura 1.1. Con el objetivo de dar una estimación de la localización de las señales sismo-volcánicas comienzan a utilizarse los arrays sísmicos y sus técnicas de procesamiento en volcanología.

En la década de los 60, con el afán de mejorar la calidad de las estaciones sísmicas para la detección y ubicación de posibles pruebas nucleares que se pudieran estar realizando en algún punto del planeta, se comenzaron a realizar los primeros test de localización utilizando arrays sísmicos, que mejoraban en gran medida la relación señal-ruido que pudiera alcanzar cualquier sensor sísmico individual. Un array sísmico está formado por varios sismómetros ubicados en distintos puntos, con una configuración geométrica y una distancia determinada entre los distintos sismómetros. La diferencia principal en el uso de arrays y redes de sismómetros para la localización, son las técnicas de análisis aplicadas a las señales sísmicas registradas por los sismómetros individualmente. Las técnicas de localización con redes sísmicas ya se han expuesto, en el caso de los arrays se basan en la búsqueda de la máxima coherencia de las señales registradas por los distintos sensores del array, mejorando la calidad de la señal sísmica mediante la suma de la señal de cada elemento de forma coherente, de esta forma se realza la señal y se minimiza el ruido. Esto implica que la parte más importante en el tratamiento de estas señales sea obtener los retardos de cada señal de forma exacta.

En la vigilancia sísmica de un volcán, para lograr una buena localización y caracterización de su actividad, se instalan estaciones sísmicas en el entorno del volcán a monitorizar. En el caso de un array de sensores sísmicos, éste debería tener unas dimensiones realmente pequeñas, de algunos centenares de metros de apertura y situarse en un sector del volcán bajo estudio. Los arrays sísmicos también se denominan antenas sísmicas debido al tratamiento que se le da a los datos que registran, asemejándolos a un radar o a una antena. Las antenas sísmicas, cuya distancia máxima entre estaciones o apertura depende de la señal que se vaya a estudiar, aplicadas a la vigilancia volcánica, permiten un despliegue rápido en una zona acotada de unos pocos centenares de metros. Los arrays sísmicos actuales están cableados, las señales procedentes de cada sensor viajan de forma analógica hasta el sistema de adquisición central que se encuentra situado a una distancia intermedia para minimizar la longitud de los cables. El sistema central, que es el gran consumidor de energía, debe realizar la adquisición de todos los sensores, establecer un control del tiempo mediante el uso de un GPS, almacenar los datos, transmitirlos mediante algún sistema de radio, etc.

Sabemos que actualmente las redes de sensores sin cables, Wireless Sensor Network (WSN) monitorizan condiciones físicas o ambientales pasando cooperativamente los datos a través de toda la red hasta un lugar común donde pueden ser analizados y procesados. En una red de sensores, un nodo es un dispositivo de bajo coste formado por un microcontrolador, un transceptor de radio de pequeño rango y varias entradas o salidas analógicas y digitales a las que se conectan sensores. La red que se forma entre estos nodos es una red ad-hoc ya que no depende de una infraestructura preexistente [Jue Yang 2010]. Tras la instalación de los nodos sensores en la zona de estudio, éstos son responsables de autoorganizarse en una infraestructura de red apropiada, a menudo formando una comunicación multi-salto. Los nodos deben responder a las peticiones de la estación base para ejecutar instrucciones específicas o enviar los datos previamente registrados. Su funcionamiento puede ser tanto de forma continua como por eventos [Matin, M. A.; Islam, M. M., 2012].

Así pues, una antena sísmica formada por redes de sensores inalámbricos permitiría establecer cualquier topología de array, eliminando la necesidad de interconexión mediante cables. El sistema inalámbrico, minimiza el coste, facilita la implementación en el campo, permite cualquier apertura cambiando simplemente el sistema de transmisión, la red es ampliable de forma sencilla, la digitalización de los datos se produce in-situ y un elemento del array puede tratarse como una estación sísmica independiente y/o ser integrada en una red de este tipo.

1.2 *Objetivos*

Este trabajo de tesis se focaliza en el campo de la actividad sísmica volcánica, con el objetivo de diseñar sistemas de monitorización volcánica de bajo coste, compactos, fáciles de instalar y de bajo consumo de energía. Esto representará un avance significativo respecto a los dispositivos existentes, tanto por la reducción de costes que implica, como por la autonomía que se obtiene en materia de tecnología. Son equipos pensados para trabajar con gran autonomía y que permitan un despliegue rápido sin necesidad de realizar una gran inversión. El logro del objetivo genérico planteado, de aportar soluciones inalámbricas para arrays sísmicos, nos lleva a la estructuración del trabajo de tesis según se detalla a continuación:

1.3 *Sincronización en redes de sensores sísmicos.*

Con este trabajo de Tesis se propone realizar aportaciones a la aplicación de redes de sensores inalámbricas a la vigilancia volcánica mediante la implementación de redes inalámbricas de sensores sísmicos. Para lograr este fin, se precisa focalizar las actividades principalmente en la sincronización temporal de los diferentes sensores.

La sincronización de tiempo es imprescindible en un array de sensores sísmicos, donde la monitorización y actuación deben ser coordinadas a través de múltiples nodos. Dado que en las referencias bibliográficas consultadas no se ha encontrado una comparativa sistemática que permita definir el protocolo más idóneo, se ha propuesto en este trabajo de Tesis la elección del protocolo que mejor cumpla con las necesidades de los arrays de sensores sísmicos inalámbricos, y como paso previo, se ha establecido una comparativa de los diferentes protocolos de redes de sensores destinados a la sincronización [Eidson 2006].

1.4 *Realización de equipos de adquisición sísmica inalámbricos*

Uno de los objetivos de la Tesis es realizar la instrumentación necesaria para el seguimiento de la actividad volcánica. A la hora de diseñar el equipo, realizando diferentes estudios en sistemas de adquisición para evaluar prestaciones, se requiere que sea de bajo consumo para conseguir la mayor autonomía posible. Dado que las regiones volcánicas están frecuentemente mal comunicadas, la transmisión del volumen de datos que se genera en crudo es imposible, por consiguiente, proporcionaría una gran ventaja el procesado in-situ donde

únicamente se transmitiese de forma automática el resultado obtenido por el empleo de algoritmos de detección de eventos. Por otro lado, disponer de instrumentación para realizar vigilancia volcánica de bajo coste, es fundamental ya que sólo el 30% de los volcanes activos tiene alguna instrumentación para vigilar su actividad [McGuire, B. et al. 1995]. A lo que cabe añadir, que la mayoría de los volcanes que carecen de vigilancia están en países en vías de desarrollo.

1.5 Array sísmico, presentación y procesado de la señal sísmica

El concepto de registro de sensores [GEOSS, 2008] debe nuclear el resto de bloques funcionales de un sistema de monitorización sísmica de la actividad volcánica. La forma más simple es que el usuario introduzca toda la información que describe el funcionamiento del array a través de una Web diseñada para tal fin. Es necesario que el registro funcione de manera dinámica y permita identificar el estado actual y la información de un instrumento o sensor. Dado que los nodos sensores cada vez están más dotados de mayor capacidad de procesado e inteligencia, el proceso de registro puede ser automático si queda perfectamente definido. Además, los nodos sensores pueden convertirse en nodos observadores recogiendo información necesaria de otros nodos a través de la publicada en el registro.

El trabajo propuesto se ha realizado indistintamente en los laboratorios siguientes:

- Grupo de investigación SARTI (Sistemas de Adquisición Remota y Tratamiento de la Información) de la UPC (Universidad Politécnica de Cataluña), grupo que trabaja desde hace más de 15 años en el desarrollado de sismómetros de fondo marino (OBS) autónomos y cableados a observatorios marinos [Shariat et al. 2008].
- Centro Geofísico de Canarias del Instituto Geográfico Nacional. Cuya principal función es la de realizar el seguimiento de la actividad volcánica en las Islas Canarias. Actividad que se desarrolla a partir de 2004 cuando el Instituto Geográfico Nacional asume la competencia de realizar la Vigilancia Volcánica.

En base a la experiencia y el conocimiento ya adquiridos en sistemas sísmicos tradicionales, se ha centrado este trabajo en la investigación y el desarrollo de un Array Sísmico inalámbrico y de parámetros ambientales para la caracterización de precursores de actividad volcánica. Como se puede observar a través de las publicaciones referenciadas, aparece una

oportunidad de desarrollo e investigación en la temática, además del interés explícito por parte de diferentes grupos de geofísicos del CSIC (Consejo Superior de Investigaciones Científicas) y del IGN (Instituto Geográfico Nacional) participantes conjuntamente con SARTI-UPC en el proyecto de investigación en riesgo volcánico, "*Peligro Volcánico y Evaluación del Riesgo en Tenerife* (PEVERTE) CGL2011-28682-C02-02".

1.6 Estructura de la Tesis

El trabajo de tesis se estructura en 7 capítulos. En el capítulo 1 se incluye la introducción, que enmarca y define los objetivos propuestos, así como la justificación del trabajo de investigación basado en el estudio, diseño y análisis de un Array Sísmico Inalámbrico aplicado a la monitorización volcánica.

En el capítulo 2 se realiza una revisión de la situación de los sistemas de adquisición aplicados a volcanología. Primero se presentan los diferentes tipos de sensores utilizados en las técnicas de vigilancia clásicas (sismología, geodesia y geoquímica), posteriormente el estado actual de los sistemas de adquisición, pasando a los arrays sísmicos, las señales volcánicas, los sistemas de sincronismo en redes de sensores y finalmente los antecedentes en redes de sensores sísmicos.

Gracias a la existencia de plataformas de bajo costo y consumo basados en Linux y a la existencia de herramientas de software libre, se describirá, en el capítulo 3, el desarrollo de una serie de sistemas de adquisición de datos para monitorización volcánica. Que pueden ser programadas en remoto y que son capaces de registrar diferentes precursores de la actividad volcánica.

En el capítulo 4, a partir de los sistemas de adquisición contruidos en el capítulo 3, se realiza el diseño una estación sísmica que será el elemento base para construir el array sísmico, donde se deberá asegurar un sincronismo temporal del orden del milisegundo entre los distintos elementos del array.

Los resultados de la caracterización y validación, de los diferentes sistemas de adquisición de parámetros ambientales y sísmicos desarrollados en el trabajo de tesis, se muestran en el capítulo 5.

Finalmente, en el capítulo 6 se recogen las conclusiones del trabajo de Tesis, junto a las futuras líneas de trabajo propuestas. Se complementa la memoria de Tesis con un capítulo más (7) dedicado a la bibliografía, y los anexos de componentes y circuitos electrónicos.

Capítulo 2

Monitorización volcánica

Las erupciones volcánicas son fenómenos que pueden afectar muy negativamente a la población en su entorno próximo, pero también a grandes distancias (por ejemplo a la aviación en caso de nubes de cenizas). Este fenómeno natural, suele venir precedido por una fase en la que se producen variaciones de diferentes parámetros que pueden ser medidos. La vigilancia volcánica proporciona los datos, que junto al conocimiento de la actividad en el pasado, permite predecir el comportamiento futuro dando respuesta al dónde, cuándo y cómo será la próxima erupción (con sus correspondientes incertidumbres). En este capítulo se dará una visión del estado de los sistemas de monitorización existentes y de sus elementos más característicos.

2.1 Introducción a los sistemas de Monitorización Volcánica

A las técnicas de vigilancia clásicas (sismología, geodesia y geoquímica), se han añadido recientemente otras técnicas (gravimetría, termometría, geoelectricidad, geomagnetismo), que permiten mejorar el conocimiento de la actividad volcánica en una zona concreta.

La sismología es la ciencia que estudia los terremotos y la propagación de las ondas mecánicas (sísmicas) que se generan en la Tierra. Los terremotos generalmente se producen por la liberación brusca de energía acumulada en la corteza terrestre, pero en zonas volcánicas pueden tener además un origen hidráulico, por sobrepresión magmática. [De la Cruz-Reyna et al. 2010].

La geodesia es la ciencia que estudia la forma y dimensiones de la Tierra. Se aplica en zonas volcánicas para ver las deformaciones de la superficie terrestre mediante el uso, por ejemplo, de estaciones GNSS o inclinómetros [Prates et al. 2008].

La geoquímica en zonas volcánicas estudia la composición de los productos volcánicos, así como los efectos de la interacción de estos con el medio ambiente en los tres estados, sólido, líquido y gaseoso [Moure, D. et al. 2013].

Las zonas en las que se hace un seguimiento de la actividad volcánica generalmente son remotas y de difícil acceso, lo que dificulta la esencial disponibilidad de datos en tiempo real, en los centros de validación, análisis y valoración. En los casos en los que el tiempo real es imposible, se llevan a cabo descargas manuales de la instrumentación instalada, consiguiendo datos con un desfase temporal, en algunos casos, excesivo. En emplazamientos donde la descarga manual de los datos sea compleja no nos permitirá realizar una correcta monitorización de la zona. El desarrollo de nuevas tecnologías *system on chip* ha permitido que el seguimiento en tiempo real de la actividad volcánica sea posible. La disminución del consumo, miniaturización de componentes, el auge de las energías renovables y la gran variedad de formas de transmitir los datos, han permitido que zonas que antes eran prácticamente imposibles monitorizar en tiempo real, ahora sea posible.

Como se ha señalado anteriormente, una correcta monitorización de la actividad volcánica se lleva a cabo mediante el uso de diferentes técnicas, siendo las principales: geofísica, geodesia y geoquímica. Aunque los sistemas de adquisición que se han desarrollado en este trabajo de Tesis tienen un propósito general, las primeras aplicaciones del mismo han sido en inclinómetros, mareógrafos y gravímetros, instrumentos que se han incorporado en un sistema de vigilancia volcánica insular. Sistemas que se describen someramente a continuación.

La microgravimetría se usa como técnica geofísica para cuantificar cambios de densidad bajo la superficie terrestre. Normalmente estos estudios se realizan instalando **gravímetros** durante días o semanas (pudiendo también ser registros continuos) y se repiten cada cierto tiempo en distintos puntos del área a estudiar, obteniéndose variaciones de gravedad en ese periodo, que luego servirán para caracterizar el estado del sistema [Williams-Jones, G. et al. 2008]. Con el desarrollo de sistemas de medida en continuo y en tiempo real, se incrementa la resolución temporal de las medidas de gravedad, además se evita que el personal de mantenimiento tenga que ser muy especializado y que haya de exponerse a los peligros derivados del trabajo en zonas volcánicamente activas [Gottsmann, J. et al. 2004]. Por otro lado, dado que los gravímetros son instrumentos que poseen una gran sensibilidad, capaces de medir variaciones de la gravedad de unos pocos μGal , serán de gran utilidad en vigilancia

volcánica (Tabla 2.1). Debido a esta gran sensibilidad, se necesita un registro simultáneo de los parámetros meteorológicos para poder corregir los valores de gravedad de su influencia [Bonvalot, S. et al. 1998].

Fabricante	Modelo	Rango	Resolución
LaCoste Romberg	G	7000 mGal	5 μ Gal
Micro-g LaCoste	gPhoneX	7000 mGal	0.1 μ Gal
ZLS Corporation	Burris	7000 mGal	1 μ Gal
Scintrex	CG5	8000 mGal	1 μ Gal

Tabla 2.1. *Gravímetros utilizados en monitorización volcánica*

Cambios en la gravedad como precursor de actividad volcánica han sido detectados en numerosas áreas volcánicas [El Wahabi, A. et al. 2007] [Greco, T. et al. 2014], así como también se han caracterizado las vibraciones de explosiones paroxísmicas en los gravímetros [Dzurisin, D. 2007].

Por otra parte, los equipos más empleados para monitorizar de forma continua la deformación del terreno son los receptores GPS e **inclinómetros**. Existen diferentes diseños de estos últimos, con sus respectivas ventajas y desventajas en términos de coste, complejidad, sensibilidad y uso (Tabla 2.2). Pueden medir desde mareas terrestres, en torno a 0.1 μ rad, hasta inclinaciones del orden de $10^{-3}\mu$ rad. La gran ventaja de este tipo de sensores en una crisis volcánica es que su salida es directamente proporcional a la inclinación del terreno, por lo que si los datos son enviados remotamente, pueden ser analizados en tiempo real, al contrario de los receptores GPS que requieren un postprocesado más complejo [Fonseca, F. et al. 2003].

Fabricante	Modelo	Tipo	Resolución
Jewell Instruments	LILY	Sondeo	< 0.01 μ rad
Sherborne Sensors	T235	Plataforma	< 0.1 μ rad
Singer Instruments	TS series	Plataforma	< 0.1 μ rad
Altheris Sensors & Controls	AILSO series	Sondeo	< 0.1 μ rad

Tabla 2.2. *Inclinómetros de alta precisión*

La información proporcionada por los inclinómetros junto con otras técnicas, permite caracterizar diferentes fenómenos como por ejemplo la intrusión de diques [Eff-Darwitch, A. et al. 2008] o movimientos de fallas [Bonaccorso, A. et al. 2004]. Es muy importante el seguimiento en continuo durante largos periodos de tiempo (años) para poder establecer un nivel base fiable y caracterizar la variabilidad natural [Peltier, A. et al. 2011], pudiéndose en

algunas ocasiones llegar a establecer una relación entre la señal medida y el tipo de erupción posible [Corrado, G. et al. 1981].

Los **mareógrafos** son dispositivos que en general sirven para establecer la altura del mar instantánea respecto al nivel del mar medio definido (idealmente se toma la media del registro de 11 años de marea) con gran precisión (Tabla 2.3). En el caso de volcanes que se encuentran cerca del mar, el conjunto mareógrafo-GPS es una herramienta útil para medir movimientos verticales del suelo [Folco, P. et al. 2010] [Kleinman, J. W. et al. 1992]. Un volumen delimitado de agua podría utilizarse como un inclinómetro natural [Otway, P. M. et al. 1989] [Andronico, D. et al. 2008].

Fabricante	Modelo	Tipo	Precisión
Vega	VegaPuls 62	Radar	± 2 mm
Seba Hydrometrie	SebaPuls 30	Radar	± 3 mm
OTT Hydromet	OTT Thalimedes	Flotador	± 2 mm

Tabla 2.3. *Sensores utilizados en la medida de mareas.*

La **monitorización visual** de un volcán es imprescindible en todo momento, pero más aún cuando su actividad es evidente, debiendo ser un dato más a la hora de valorar el estado de un volcán. Varios ejemplos de la importancia del seguimiento de la actividad volcánica a través de imágenes se pueden encontrar en trabajos de caracterización de erupciones de gran explosividad [Dibble, R. R. et al. 2008] y la relación entre los datos registrados por otras técnicas y su manifestación en superficie [Moure, D. et al. 2013].

Desde que aparecieron **sismógrafos** portátiles a finales de la década de los 60, se han instalado en numerosos volcanes durante distintos estados de actividad volcánica. Con el objeto de detectar todas las posibles señales que pueden propagarse por el interior de la tierra se han diseñado muchos sensores sísmicos con diferentes respuestas frecuenciales (Tabla 2.4). Lo que ha permitido realizar estudios más profundos del comportamiento de los volcanes [Aki K. and Koyanagi, R. 1981] [Chouet, A. 1996].

Marca	Modelo	Tipo	Componentes
Kinematics	STS2	Banda ancha	Triaxial
Kinematics	SS-1	Corto periodo	Monoaxial
Mark Products	L-4C	Corto periodo	Monoaxial

Tabla 2.4. *Algunos sensores sísmicos utilizados en vigilancia volcánica*

2.2 *Sistemas de adquisición de datos sísmicos*

Comercialmente existe una gran variedad de sistemas de adquisición para la medida de la actividad sísmica, terrestre y en menor medida marina. Una de las mayores diferencias entre ambos, reside en la complejidad estructural de las carcasas que requieren los diseños marinos, y la necesidad de sistemas de asistencia adicional para su instalación o mantenimiento en el fondo del mar [Zhu et al. 2009]. Así mismo, los sistemas marinos autónomos no tienen acceso a las señales GPS (*Global Positioning System*), por lo que requieren relojes más precisos y con una deriva lo más lineal posible durante el tiempo de inmersión [Shariat et al. 2009] [Pallarés et al. 2013]. Cabe añadir, que es difícil el acceso a los datos en tiempo real, especialmente cuando se encuentran ubicados a profundidades superiores a 500m, por lo que no suelen utilizarse en el seguimiento de una crisis volcánica.

En el campo de la sísmica terrestre, se utilizan equipos destinados a la monitorización de la actividad sísmica natural o inducida (presas, almacenes de gas,...). Empresas como "Refraction Technology, Inc." [Refraction 2015], dispone de equipos con consumos que puede alcanzar los 500 mW, pero que se ven penalizados con una autonomía muy reducida. En el caso de "Worldsensing" [Worldsensing 2015] dispone de un equipo llamado Spidernano, que puede trabajar de forma autónoma hasta un máximo de 50 días. Está diseñado para la adquisición con sensores de banda ancha y con una batería de 12 V (batería de plomo y ácido), con un consumo de alrededor 500mW.

La instrumentación sísmica para el estudio de terremotos está centrada en sistemas de adquisición de datos con telemetrías en tiempo real o casi real, que requieren de importantes suministros de energía. Estos sistemas operan generalmente con sensores de banda ancha de gran tamaño y coste elevado, en los que se suele priorizar los requisitos del propio sensor frente a la optimización del consumo. Aunque el sistema de adquisición pueda trabajar con otro tipo de sensor de bajo consumo y tamaño, entonces no se aprovecharían todas las prestaciones del propio equipo de adquisición, lo que en definitiva supondrá un coste económico superior al necesario.

Mayoritariamente los sistemas de adquisición sísmica almacenan los datos en una memoria interna [Fertitta et al. 2010] y en algunos casos de sísmica terrestre también son enviados por telemetría a otro nodo remoto [Werner et al. 2005]. Un ejemplo de este segundo caso, es el trabajo conjunto de la Universidad de Harvard, New Hampshire y Norte de Carolina [Werner et al. 2006], donde todos los equipos de una misma red sísmica envían los datos a un mismo equipo concentrador, con mayor velocidad de procesado, que permite comparar la

información de las diferentes estaciones de la red. Aunque el equipo cuenta con una autonomía inferior a una semana.

Existen diversos estudios enfocados a la investigación de nuevos sistemas de adquisición sísmica [Lopattanakij et al. 2011] [Tiwatthanont et al. 2011], que aportan nuevos avances tecnológicos. Por ejemplo, a partir de elementos de adquisición de bajo coste, como es el uso de un conversor de 16 bits y un ordenador con una aplicación trabajando en entorno "LabView" [Liu et al. 2009], creando un sistema de adquisición sísmica virtual. Otros sistemas de adquisición pueden llegar a ser más complejos, realizados con unidades de tipo PC104 [Kumar et al. 2009], que permiten mejores prestaciones para el procesado de datos y una mayor accesibilidad al usuario. También hay sistemas que proporcionan una gran capacidad de cómputo, como PARALLELLA o GIZMO 2, pero son equipos voluminosos o tienen un coste elevado y una baja o nula autonomía.

Como se ha visto en las bibliografía consultada, no existen en el mercado actual instrumentos para el seguimiento de la actividad volcánica que cumplan los requisitos de autonomía y bajo coste como los realizados en la propuesta del trabajo de Tesis.

2.3 Señales Volcánicas

Hay dos tipos de ondas sísmicas, las internas y las superficiales. El primer tipo corresponde a las ondas que viajan por el interior de la tierra y suelen clasificarse en ondas P (primarias) y S (secundarias). Las primeras de ellas tienen un desplazamiento por compresión mientras que las S realizan un movimiento de cizalladura (Figura 2.1) y de media la velocidad P es 1.73 veces la velocidad de S. Debido a esta diferencia de velocidad, las ondas P se denominan primarias, por ser las primeras en llegar y las S se denominan secundarias por llegar tiempo después [Bormann et al. 2002]. Cuando las ondas internas llegan a la superficie se generan las llamadas ondas superficiales debido a que sólo se propagan por las capas más superficiales de la Tierra. Estas ondas son generadas por la reflexión de las ondas P y S en la superficie libre, dando lugar a dos tipos: ondas Rayleigh, que producen un movimiento elíptico retrógrado y ondas Love, que producen un movimiento perpendicular a la dirección de propagación.

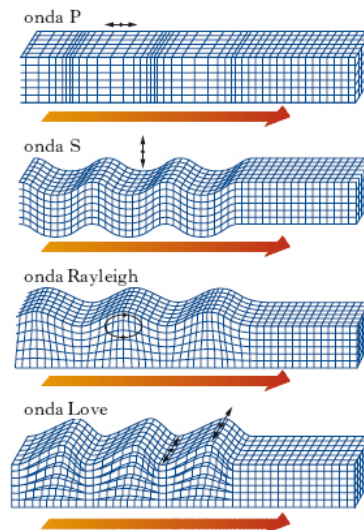


Figura 2.1. Esquema del desplazamiento de las ondas internas y superficiales

Los terremotos que se producen en regiones volcánicas pueden tener una serie de características propias que los distinguen de los que ocurren fuera de estas regiones, tanto en su forma de onda como en su contenido espectral. Esto es debido, en parte, al mecanismo que los genera (resonancia en cavidades, movimiento de fluidos, etc.), pero también al medio en el que se producen por su elevada heterogeneidad. Pudiéndose establecer una clasificación según el tipo de señal: eventos volcano-tectónicos (VT, contenido frecuencial entre 1 y 10 Hz), de largo periodo (LP, de 1 a 3 Hz), eventos híbridos (HYB, características de VT y LP), explosiones (EXP), tremor volcánico (TRM) [Ibáñez et al. 2012] [Lahr et al. 1994]. En otras publicaciones [Zobin 2012] se mencionan además los lahares (LAH) y los flujos piroclásticos (PF). Mediante el empleo de arrays, todas estas señales, que presentan gran complejidad, pueden ser caracterizadas y localizar su fuente. En la Figura 2.2 se muestran tres señales volcánicas típicas que no pueden ser localizadas por una red sísmica pero sí con técnicas de array.

En el seguimiento de la actividad volcánica cobra especial importancia la determinación de señales precursoras, en el caso de la sísmica con un aumento significativo del número de eventos de baja magnitud, por lo que es de vital importancia que se tengan datos en tiempo real [Domínguez et al. 2014].

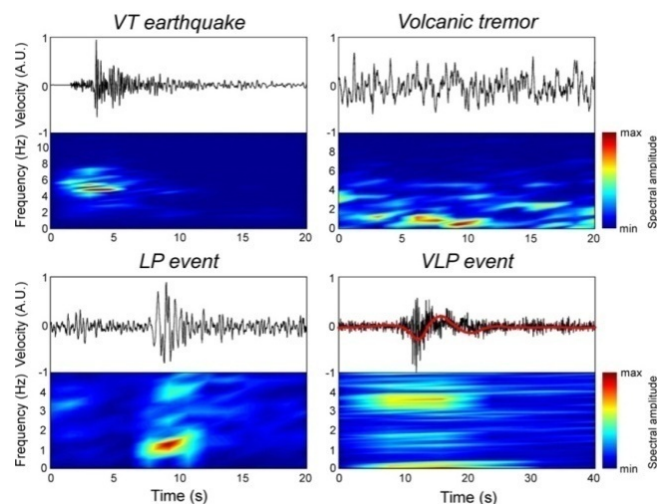


Figura 2.2. Señales típicas de ambientes volcánicos. Mientras que un terremoto volcano-tectónico (VT) puede ser localizado por una red sísmica, el resto de señales tan sólo pueden ser localizadas con cálculos de tipo antena.

2.4 Introducción a los arrays sísmicos

Los primeros arrays sísmicos nacen vinculados a la detección y localización de posibles pruebas nucleares. El CTBT (Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty) es un tratado internacional aprobado en 1996 por el que los países firmantes prohíben la realización de ensayos nucleares en sus territorios. Desde 1945, en que se realizó el primer ensayo nuclear, varios tratados han sido redactados hasta la actualidad. Hoy en día este tratado ha sido suscrito por 178 países de los 195 miembros de Naciones Unidas. El organismo que se encarga de vigilar su cumplimiento de este tratado es la Comisión Preparatoria para la Organización del Tratado de Prohibición Completa de Ensayos Nucleares (CTBTO), creada en 1996 y situada en Viena. Cuenta con un Sistema de Monitorización Internacional (IMS, International Monitoring System) que consiste en una red de sensores sísmicos, hidroacústicos, de infrasonidos y radioisótopos repartidos por todo el mundo. El IDC (International Data Centre) se encarga de analizar estos datos y enviar los resultados a los países firmantes del tratado [CTBTO, 2013].

El concepto de red sísmica es muy amplio, pues se puede considerar desde una red convencional de dimensiones regionales como la Red Sísmica Nacional de España [IGN 2013] o una red de pocos kilómetros de diámetro o, incluso, una estación de tres componentes. La primera, que podría llamarse red regional, estaría compuesta por estaciones distribuidas a lo largo de cientos de kilómetros y permite realizar, por un lado, el cálculo epicentral de los sismos regionales y por otro, mediante métodos de análisis tipo antena, localizar los telesismos a partir de una determinada magnitud [Martínez, J. M. 1992].

El procesado de dispositivos sísmicos de tipo antena, permite una mejora de la relación señal-ruido. También permite realizar la separación de señales que llegan al dispositivo casi al mismo tiempo o descomponer las señales en función de su contenido en frecuencias, del acimut de llegada y de la velocidad. Con todo este procesado de señal se puede llevar a cabo la detección, identificación de fases, discriminación y localización de eventos sísmicos de origen artificial o natural a distancias regionales o telesísmicas, así como la realización de estudios sobre la estructura de la tierra, propagación de ondas, etc.

Este tipo de redes comenzaron a estar operativas a partir de los años 60 con la instalación, entre otros, de los dispositivos YellowKnife (Canadá) [NEM 2013], NORSAR (Noruega) [NORSAR 2013], LASA (EE.UU.) [Frosch and Green 1966]. Posteriormente se crearon dispositivos de menor apertura como los del NORESS (Noruega) [NORSAR 2013], FINESA (Finlandia) [MarjaUski 1990] o Grafenberg (Alemania).

Actualmente NORSAR es una fundación de investigación geofísica independiente, especializada en soluciones software y en actividades de investigación en el campo de la sísmica. Posee varios arrays sísmicos para la vigilancia de explosiones nucleares [NORSAR 2013]:

- ARCES: array telesísmico formado por 33 estaciones de corto periodo y 3 de banda ancha de tres componentes.
- NORES: es un array sísmico con la misma disposición geométrica y equipamiento que ARCES. Fue cerrado en 2002 y reabierto en 2011 para experimentación.
- NORSAR: formado por 132 sismómetros de corto periodo y 22 de tres componentes y largo periodo. Está formado por clústeres que se han colocado geométricamente por todo el territorio. En cada clúster hay una estación de largo periodo y 5 de corto. Es el mayor array y el más importante de Europa.
- SPITS: array más reducido que los anteriores, con tan sólo 9 estaciones de corto periodo.
- HFS: formado por 9 sismómetros de corto periodo y uno de tres componentes y banda ancha.

A mediados del siglo XX, por un acuerdo entre el estado español y EE.UU, se instala el Dispositivo Sísmico de Sonseca para detectar posibles explosiones nucleares en Oriente Próximo y Medio. Durante muchos años fue un emplazamiento militar de EE.UU. Tras la firma por parte de España del Tratado de No Proliferación de las Armas Nucleares, el gobierno de EE.UU cede finalmente las instalaciones a España y es el IGN la institución que se hace cargo de su

mantenimiento y explotación. Actualmente el emplazamiento de Sonseca está formado por dos arrays:

- De corto periodo: Formado por 19 estaciones de corto periodo y 3 componentes y un sensor de banda ancha de 3 componentes, situados alrededor del término municipal de Sonseca.
- De largo periodo: Más amplio que el anterior, formado por 23 sensores de largo periodo situados en distintos términos municipales en torno a Sonseca.

Aunque la razón primera para el desarrollo, instalación y mantenimiento de arrays sísmicos fue su gran capacidad para la vigilancia de ensayos nucleares, también son útiles en otras aplicaciones relacionadas con el conocimiento de la Tierra. El análisis detallado de los datos de array ha llevado a la mejora de los modelos de velocidad del interior de la Tierra y a una mejor comprensión de los fenómenos de propagación de ondas [Almendros 1999]. Permiten evaluar la peligrosidad sísmica de un determinado emplazamiento y evitar posibles catástrofes, como es el caso de ciudades situadas sobre estructuras sedimentarias que pueden amplificar las ondas sísmicas de manera significativa. Un ejemplo de este tipo de estudios es el experimento de Cavola (Italia) donde se conformó un array de 95 elementos durante 3 meses en 2004 para el estudio de una zona sedimentaria que ya había sufrido la destrucción de una ciudad en 1960 [Bordoni, P. et al. 2007].

El servicio sismológico suizo [SED 2013] también utiliza arrays para la caracterización de sitio mediante vibraciones ambientales. El suelo está permanentemente sometido a vibraciones de distintas fuentes: naturales (océanos, tormentas, etc); condiciones meteorológicas locales (viento, lluvia) y actividades humanas (industrias, tráfico, etc) [Michel, C. 2010] [Stamm, G. Burjanek, J. 2008]. La caracterización de suelos se lleva a cabo también en centrales nucleares [Gassner-Stamm, G. 2009].

La apertura del array está relacionada con el rango de frecuencias a medir. Si la separación de los distintos sensores es demasiado grande se produce *aliasing* espacial, similar al *aliasing* temporal cuando se muestrean señales a frecuencias demasiado bajas. Como se ha visto, una red local puede ser tratada como un array, si la distancia media entre sensores es de pocos kilómetros pueden aplicarse técnicas de tipo antena para la detección de terremotos lejanos, debido a que las ondas que se propagan tienen muy baja frecuencia. En general, la separación entre sensores debe ser menor que la mitad de la longitud de onda a registrar [Asten, M. W.; Henstridge, J. D. 1984]. En volcanología, debido a la frecuencia de las señales que se registran, la apertura de los arrays será de algunos centenares de metros.

En base a lo expuesto, las ventajas principales del uso de arrays sísmicos frente a redes de estaciones sísmicas en vigilancia volcánica son:

- Las señales correlacionadas se suman mientras que el ruido es eliminado, proporcionando una mejora de la relación señal/ruido.
- Permiten analizarla procedencia de señales volcánicas que no poseen fases P y S y por tanto no pueden ser localizadas por una red de estaciones sísmicas convencional (Tremor, LP, etc.).
- Mayor facilidad de implementación que una red sísmica local debido a que el área de instalación es mucho menor.

Su uso también supone unas desventajas:

- La precisión en la localización es menor que la que se pueda obtener con una red sísmica. Debido principalmente a que implica conocer la distribución vertical de velocidades de las ondas sísmicas utilizadas.
- Para dar una localización más exacta se necesitan al menos dos arrays.
- La localización en profundidad sólo se consigue con sensores de tres componentes.

El Instituto Andaluz de Geofísica ha instalado arrays sísmicos en diferentes regiones volcánicas: la isla de Stromboli [Chouet, B.A. et al. 1997], en Las Cañadas del Teide [Almendros 2000], en la isla Decepción [Ibáñez, J.M. 2000]. Todos ellos siguen un mismo diseño modular, en el que, cada módulo tiene ocho canales para la entrada de las señales sísmicas. Estos módulos se conectan a un ordenador personal que controla todo el sistema y almacena los datos (figura 2.3). El cableado entre sensores y el sistema de adquisición de datos limita la apertura del array a unos pocos centenares de metros. Este sistema funciona mediante disparo con un algoritmo STA/LTA (Short Time Average/Long Time Average) [Almendros 1999]. La experiencia adquirida por este grupo en el campo de la instrumentación sísmica, ha permitido la colaboración en el desarrollo de otras antenas sísmicas como son las del Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS) y la del Vesubio.

Los Laboratorios Nacionales del Gran Sasso son instalaciones que pertenecen al Instituto Italiano de Física Nuclear y que se dedican a la física de partículas. Los laboratorios son subterráneos y es el lugar en el que se instaló una antena sísmica similar a las citadas anteriormente. El hecho de que el emplazamiento sea subterráneo permite un registro con muy buena calidad señal/ruido [Saccorotti, G. et al. 2006].

Como se ha visto anteriormente, la distancia entre sensores en un array sísmico depende de la frecuencia de la señal que se quiere estudiar [Asten, M. W.; Henstridge, J. D. 1984]. El hecho de medir señales volcánicas supone que las estaciones estarán situadas en el entorno del volcán y muy próximas entre sí, por lo que un cálculo de localización como el esquematizado en la Figura 1.1 no es posible, ya que los tiempos de llegada entre las fases serán prácticamente iguales y por tanto es difícil calcular el hipocentro. Sin embargo, los arrays se benefician de esta circunstancia, ya que si las estaciones están próximas, los frentes de onda mantienen cierta coherencia espacial entre sí, en este caso no se trata de reconocer fases distintas (P y S), si no de intercomparar sismogramas registrados en los distintos sismómetros, esto permite que señales que no tienen fases puedan ser detectadas. En vigilancia volcánica es muy útil hacer un procesado en tiempo real de la señal que se está monitorizando con el array, pues las diferentes señales sísmicas pueden indicar la evolución del fenómeno volcánico, que puede ser rápido. Es importante destacar que el resultado obtenido por cálculos de tipo antena nos dan una dirección y una velocidad aparente o su inversa, la lentitud, pero no la ubicación del foco. Para determinar su ubicación se utilizan otras técnicas como el trazado inverso del rayo, que consiste en determinar el camino que han seguido las ondas sísmicas a través de un modelo de corteza, para llegar a las estaciones con un cierto ángulo de incidencia, tiene la limitación de que hay que suponer un modelo de tierra, aunque disponiendo de otro array se puede aplicar el mismo método y utilizar pura geometría, es lo que se conoce como localización conjunta [La Rocca et al. 1998].

Inicialmente, en los diseños de array, se usaban algoritmos de detección de eventos para minimizar el uso de la memoria ya que hace algunos años era bastante limitada [Almendros 1999]. Hoy en día esto no supone ningún problema y la tendencia es almacenar los datos en soporte digital. Esta gran cantidad de datos, que depende del número de elementos del array, deben ser procesados simultáneamente, por lo que normalmente los datos son descargados y tratados posteriormente o se hacen llegar a un centro de recepción, sin ser almacenados de forma local, donde se realizan los cálculos [Song et al. 2009].

Las distintas técnicas que se usan en los cálculos de arrays sísmicos para localizar la fuente sísmica de la actividad volcánica se pueden aplicar en el dominio temporal o en el frecuencial. En el dominio temporal, la técnica más común es la de correlación cruzada [Pezzo et al. 1993], en el dominio frecuencial destaca la técnica de clasificación múltiple de señales (Multiple Signal Classification, MUSIC) [Schmidt, R.O. 1986] [Goldstein, P.; Archuleta, R. J. 1978], la denominada zero-lag cross-correlation [Frankel et al. 1991] y la de formación del haz (beam-forming) [Lacoss, R. T.; Kelly E. J. 1969] [FenglinNiu 2011].

Son muchos los métodos que permiten determinar los parámetros de propagación de las señales registradas en un array sísmico. Existen métodos sencillos que permiten dar una solución rápida y aproximada mientras que otros permiten dar una solución exacta pero que implica un mayor tiempo de procesamiento. El método más sencillo es el de la producción de haz (beam-forming) también llamado retardo y suma simple [Green et al. 1966] [Capon et al. 1968], donde lo que se desea es calcular el azimut y el vector lentitud aparente.

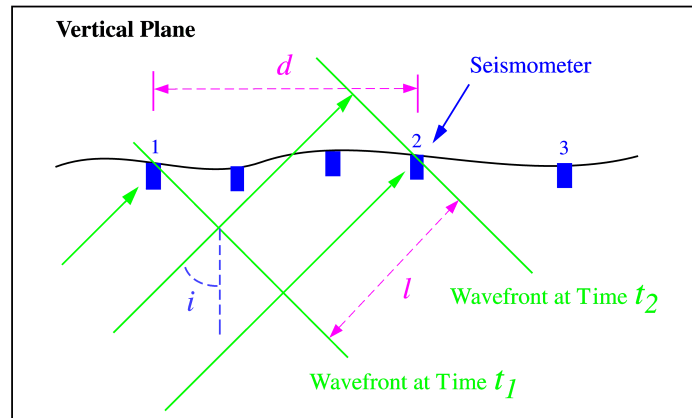


Figura 2.3. Frente de onda plano atravesando un array sísmico

Cuando un frente de ondas plano atraviesa un array con un cierto ángulo de incidencia (Figura 2.3), la velocidad a la cual la onda atraviesa aparentemente todos los sensores se denomina velocidad aparente, esta velocidad no es real, es la velocidad vista por cada instrumento y solamente será aproximadamente igual a la real cuando el frente de ondas sea paralelo a la superficie, es decir, que el ángulo de incidencia sea aproximadamente de noventa grados con respecto a la vertical. La inversa de la velocidad aparente se llama lentitud, y representa la variación del tiempo de viaje de los frentes de onda con la distancia epicentral. Esta magnitud está íntimamente relacionada con el medio que atraviesa la onda [NMSOP-2 2012].

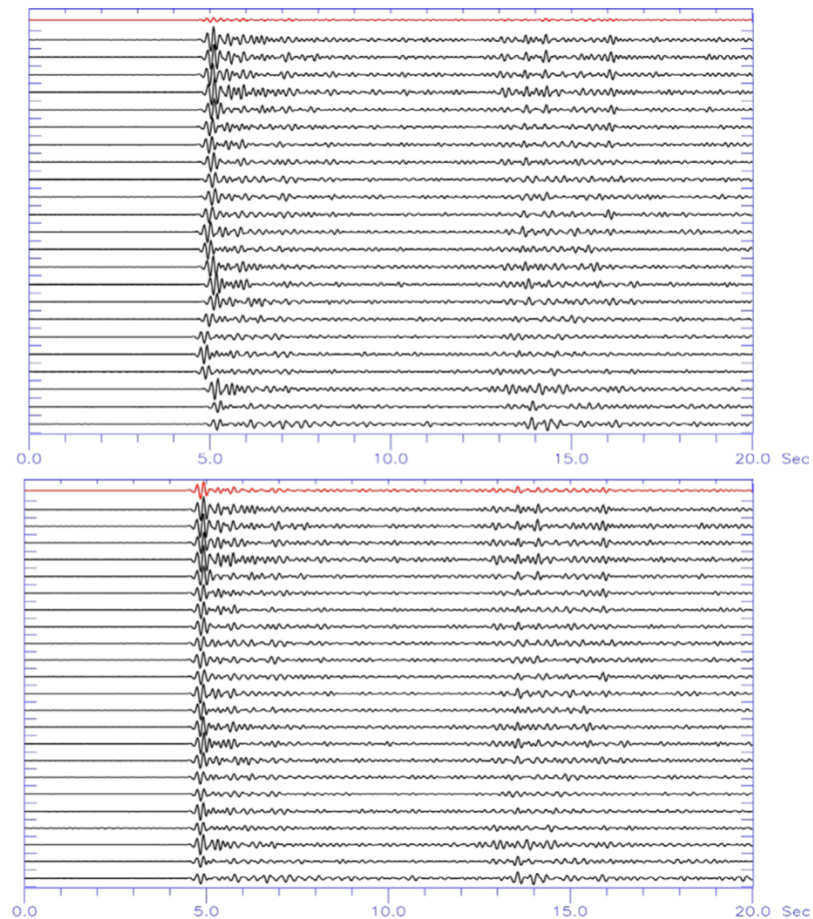


Figura 2.4. Técnica de beam-forming aplicada a un array de 23 elementos

La mayoría de los métodos proporcionan estimaciones de dos parámetros, el azimut de donde proviene la señal y la lentitud aparente con la que sus frentes de onda se propagan a través del array. La determinación de ambos equivale a conocer el vector lentitud aparente o lo que es igual, el número de onda aparente, ya que está relacionado con el anterior a través de la frecuencia. Un planteamiento sencillo consiste en determinar los retrasos de las llegadas de la señal a todas las estaciones del array, estimándose así el vector lentitud mediante un ajuste por mínimos cuadrados de los datos [Almendros 1999]. En el caso del método de formación del haz (beam-forming), que alinea las trazas en el tiempo hasta que las llegadas coincidan y luego las suma (Figura 2.4), requiere un conocimiento previo del azimut y del vector lentitud para poder calcular estos retardos. En la práctica se puede llevar a cabo de dos formas: realizando todas las combinaciones de azimut, lentitud y seleccionando aquella orientación donde se obtenga la señal más clara, o bien se preseleccionando estos teniendo en cuenta el orden de llegada a las distintas estaciones [Martínez, J. M. 1992]. En este sentido el array

sísmico se comporta como un radar o una antena, con el resultado obtenido de cada dirección y velocidad se evalúa una función que nos diga si se realza la señal o por el contrario es únicamente ruido, esta función podría ser la relación señal ruido.

2.5 *Sincronización en redes de sensores*

El desarrollo de los sistemas de comunicación inalámbricos y las crecientes posibilidades de miniaturización de los sensores, dispositivos de almacenamiento y procesamiento de datos, han abierto las puertas a una nueva generación de redes de sensores inteligentes distribuidos en el área a monitorizar, y conectados mediante una red de comunicaciones. Siendo el aspecto que diferencia a las Redes de Sensores de un mero conjunto de sistemas sensoriales interconectados, el comportamiento cooperativo que se establece, la capacidad de procesar los datos como un conjunto, eliminando/filtrando el ruido y los valores anómalos o redundantes y adaptando las condiciones de medida a los cambios detectados en el medio. Para conseguir esta característica diferencial, se deben de cumplir requisitos como: disponer de inteligencia en cada nodo, acomodar sensores forzosamente heterogéneos, conseguir un buen rendimiento independiente de la dispersión geográfica de los elementos. Cada sensor debe poder acceder a una parte del conocimiento generado y a las actividades de bajo nivel de otros elementos de la red. Los datos deben de ser perecederos, en el sentido que su valor depende del tiempo empleado en su adquisición y procesamiento. Debe existir la suficiente información en el sistema para superar ciertas condiciones adversas (fallos en los nodos o enlaces de comunicación) sin que el conjunto se resienta. Todos los aspectos planteados en la gestión y adquisición de datos en una red de sensores, nos aportan muchas razones para introducir la estandarización en su instalación y modo de operación.

2.5.1 *Redes de sensores inalámbricas*

Basándose en dispositivos de bajo coste y consumo, las tecnologías de redes inalámbricas han tenido un rápido desarrollo en los últimos años, siendo actualmente capaces de obtener información de su entorno, procesarla localmente y comunicarla a través de enlaces inalámbricos hasta un nodo central.

Los distintos nodos de una red no tienen conocimiento de la topología de la red y por tanto deben descubrirla [García, L. J. 2009]. Cuando un nuevo nodo aparece en una red, anuncia su presencia y escucha los mensajes del resto de nodos vecinos. El nodo se informa

continuamente de los nuevos nodos a su alcance y de la manera de encaminarse a través de ellos. Existiendo varios protocolos de enrutamiento:

- Protocolo de Difusión directa (modelo de un salto): es el más simple, todos los nodos transmiten a la estación base.
- Modelo Multi-salto (multi-hop): en este modelo un nodo transmite sus datos hacia la estación base a través de un nodo vecino que es el más próximo a la estación base, a su vez, éste enviará los datos a otro nodo más próximo hasta que finalmente llegue al nodo base.

Otros protocolos utilizan diferentes técnicas de optimización para mejorar la eficacia del modelo anterior. Una de ellas es la que hace que los nodos sensores se comuniquen solo con otros sensores dentro de su vecindario formando clústeres. Los nodos cooperan entre sí para obtener una respuesta única que el nodo base dentro del clúster transmitirá a la estación base.

En un array circular o en estrella se puede escoger un protocolo de difusión directa, estando el nodo base en el centro. En un array lineal en el que el nodo base deba situarse en un extremo, el protocolo a usar podría ser el que usa un modelo multi-salto, también sería adecuado en un array denso de sensores, en el que la pérdida de uno de ellos no debiera repercutir en el resto.

Un nodo sensor se compone de cinco componentes básicos: transductor, unidad de procesado, memoria, unidad de comunicaciones y unidad de energía [Chong, Kumar 2003]. Gracias a los avances en las tecnologías modernas, sensores, procesadores y dispositivos de comunicación son cada vez más pequeños y más baratos. Todas las subunidades pueden encajarse en un módulo del tamaño de una caja de cerillas con un coste de producto relativamente bajo. Las comunicaciones inalámbricas ofrecen la interconexión más flexible y fácil entre dispositivos sin depender de ninguna conexión física. En los últimos años, se han logrado grandes progresos en los nuevos tipos de sistemas inalámbricos. En la Figura 2.5 se muestra una comparativa costo/complejidad y velocidades de datos de diferentes tecnologías inalámbricas.

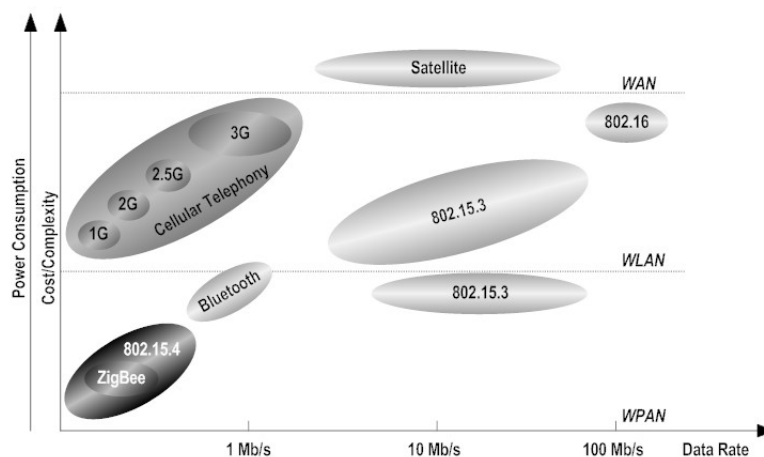


Figura 2.5. Comparativa de tecnologías inalámbricas

En las redes inalámbricas cada nodo tiene su propio reloj y por tanto tienen una noción del tiempo propia que no coincide con el resto de nodos. En las aplicaciones de redes de sensores inalámbricos, como el registro sísmico/volcanológico, es de suma importancia saber con precisión cuándo se muestrearon los datos o cuándo ocurrió un evento determinado, siendo crucial en la realización de una serie de operaciones fundamentales:

- A. **Integración de datos:** el funcionamiento sincronizado de la red permite el correcto procesamiento e integración de los datos recopilados que residen en diferentes fuentes. Las redes WSN *multihop* (multisalto) dan lugar a variaciones en el tiempo de suministro de la información, que es proporcional a la distancia entre cada nodo y la pasarela (gateway). En consecuencia, el registro temporal de los datos en el momento en que los paquetes son recibidos por la pasarela, no representa correctamente el tiempo de detección de los eventos. En una red sincronizada, el registro temporal de los datos en la propia fuente (timestamping) o el cálculo del tiempo de entrega, permite la grabación correcta (retardo) y la integración de los datos recogidos de acuerdo con sus marcas de tiempo.
- B. **Protocolos de la capa de enlace de datos sincronizados:** muchos protocolos de programación requieren sincronización de reloj. Por ejemplo, el esquema de acceso múltiple por división de tiempo (TDMA), utilizado también para implementar el protocolo HDLC (High-Level Data Link Control) en redes de transmisión WSN, sólo es aplicable en redes sincronizadas. El protocolo requiere que los nodos vecinos se sincronicen para que puedan seguir un marco de tiempo común.
- C. **Protocolos síncronos de ahorro de energía:** la eficiencia energética es un factor importante para las redes WSN con fuente de alimentación limitada, donde

los nodos se despiertan periódicamente para intercambiar paquetes de datos. Por ejemplo, el ciclo de servicio (control de modos *sleep* y de activación) ayuda a los nodos a ahorrar energía. En estos protocolos, los ciclos de *sleep* de todos los nodos tienen que estar sincronizados globalmente. Por lo tanto, la sincronización en toda la red es esencial para el ciclo de trabajo eficiente, y su rendimiento es proporcional a la precisión de sincronización.

- D. **Sincronización con el tiempo global:** un WSN que está sincronizado internamente también se puede sincronizar con un tiempo global, por ejemplo el tiempo universal coordinado (UTC), a través de una simple conversión entre la hora local de la red y UTC. Como resultado, la integración de múltiples WSN con Internet será fácil de realizar.

2.5.2 *Imprecisión del reloj*

Mantener el tiempo común en los nodos de sensores inalámbricos conlleva múltiples dificultades. En primer lugar, un nodo WSN estándar lee los valores de tiempo de los temporizadores de su microcontrolador o microprocesador integrado. Los temporizadores suelen estar sincronizados por un oscilador de cristal de bajo coste, cuya frecuencia difiere de la frecuencia nominal, y esta diferencia no es la misma en todos los nodos de la red [Akyildiz, I. F.; Vuran, M. C. 2010]. Por otra parte, el envejecimiento del oscilador, los cambios en la temperatura y el voltaje de la fuente de alimentación, el choque mecánico, la vibración y la radiación ionizante dan lugar a la inestabilidad significativa de la frecuencia. Ésta es una de las principales causas de las diferencias continuamente crecientes entre las lecturas de reloj de los diferentes nodos.

Idealmente, el reloj de un nodo sensor debería configurarse de modo que $\tau(t)=t$, donde t representa el tiempo ideal o de referencia [ChungWu, Y. et al. 2011]. Sin embargo, la mayoría de los osciladores no son tan precisos. Por ejemplo, un oscilador de cristal de cuarzo comúnmente utilizado en redes de sensores proporciona una frecuencia de fuente con una precisión total de hasta ± 40 ppm, lo que significa que los relojes de diferentes nodos pueden perder hasta $40\mu s$ en un segundo causando un error de reloj de aproximadamente 3.5 segundos por día. En general, el reloj de cada sensor i representa el tiempo como un valor $\tau_i(t)$ en cada instante, que es una función del tiempo, t , como se muestra a continuación:

$$\tau_i(t) = \theta + \rho \cdot t \quad [1]$$

donde los parámetros θ y ρ se denominan desplazamiento (offset) de reloj (diferencia de fase) y desviación (skew) de reloj (diferencia de frecuencia), respectivamente. La Figura 2.6 muestra la representación gráfica del modelo de reloj de los nodos sensores. El comportamiento de los relojes rápidos, lentos y perfectos se ilustra mediante el Nodo A, el Nodo B y el reloj ideal respectivamente.

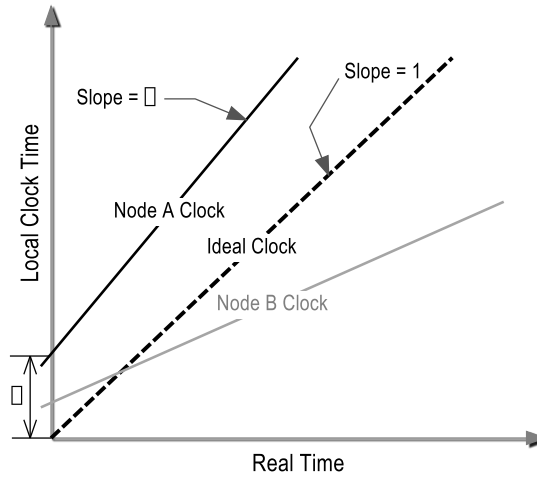


Figura 2.6. Modelo de reloj de los nodos sensor con respecto al reloj ideal

El reloj local de un nodo B se puede representar en relación con el nodo A de la siguiente manera:

$$\tau_B(t) = \theta_{AB} + \rho_{AB} \cdot \tau_A(t) \quad [2]$$

donde θ_{AB} y ρ_{AB} representan el desplazamiento relativo del reloj y la desviación entre el Nodo A y el Nodo B, respectivamente. Si dos relojes están perfectamente sincronizados, $\theta_{AB} = 0$ y $\rho_{AB} = 1$. La tarea de un protocolo de sincronización es estimar θ_{AB} y ρ_{AB} de modo que el Nodo B pueda ajustar su propio reloj o traducir su información de temporización a la escala de tiempo del Nodo A cuando sea necesario. Proporcionar un marco de referencia común requiere que la desviación y el desplazamiento del reloj de referencia entre los nodos de la red se minimicen. En general, el desplazamiento relativo del reloj sigue cambiando con el tiempo, lo

que significa que la red tiene que realizar una re-sincronización periódica del reloj para ajustar los parámetros del reloj [ChungWu, Y. et al. 2011].

Por supuesto, los relojes de los nodos de la red pueden ajustarse periódicamente, por ejemplo ajustando sus temporizadores a los valores de tiempo recibidos de algún reloj de referencia. Sin embargo, los retardos de comunicación inalámbrica pueden ser del orden de algunos milisegundos e incluyen componentes aleatorios, lo que hace que el ajuste simple del reloj sea ineficaz.

Con el fin de mantener las diferencias entre los relojes de los diferentes nodos WSN dentro de unos límites aceptables, especiales métodos de sincronización para WSN tienen que ser diseñados y validados.

2.5.3 Métodos de sincronismo

Los errores de sincronismo pueden tener múltiples orígenes. Los más comunes son los siguientes.

En primer lugar, los errores de canal inalámbrico hacen que se pierdan algunos de los mensajes de sincronización. Por lo tanto, algunos nodos de la red pueden estar sin sincronizar. En consecuencia, la red se divide en diferentes zonas con diferentes tiempos sincronizados, lo que impedirá la sincronización de toda la red. Por lo tanto, se requieren métodos robustos de sincronización.

En segundo lugar, la naturaleza de transmisión del canal inalámbrico requiere protocolos MAC que se utilizan para un acceso eficiente de canal. Estos protocolos MAC introducen un retardo de acceso no determinista, que es el tiempo transcurrido entre el instante que el paquete de sincronización es enviado por el protocolo de sincronización, y el momento en que se transmite realmente este paquete. Como veremos a continuación, la operación de acceso al canal introduce una aleatoriedad importante en la sincronización del tiempo y debe tenerse en cuenta en los cálculos.

Finalmente, el canal inalámbrico introduce un retardo asimétrico entre dos nodos para los intercambios de mensajes. Dado que los tiempos de acceso así como los tiempos de transmisión pueden variar debido a errores de canal y retransmisiones, el retardo de comunicación puede ser diferente para cada dirección. Este es un punto importante para la sincronización, ya que la mayoría de las soluciones se basan en intercambios de mensajes consecutivos donde el tiempo de ida y vuelta entre dos nodos es considerado en los cálculos.

Mientras que, para las redes cableadas, el tiempo de ida y vuelta es aproximadamente igual al doble del retardo en una dirección, la comunicación inalámbrica produce retrasos asimétricos en cada dirección.

El método más fácil para obtener sincronismo entre todos los nodos es que cada uno de ellos esté equipado con un receptor GPS [Rhee 2009]. Los receptores GPS pueden ofrecer la marca de tiempo con una precisión de 200 ns. Sin embargo, los esquemas de adquisición de relojes basados en GPS muestran algunas debilidades: no siempre se tiene accesible la constelación de satélites como es el caso de instalaciones en galerías y túneles, y además requiere un receptor de potencia relativamente alta que impide que se puedan alcanzar buenos niveles de autonomía energética, necesarios en redes basadas en sensores pequeños y de bajo coste. Esta es una motivación para desarrollar enfoques basados en software para lograr la sincronización de tiempo dentro de la red. La desventaja de este enfoque es que las señales de temporización deben compartir los canales de comunicaciones sobre los que se transmiten los datos y pueden sufrir retrasos o pérdida de paquetes. Este aspecto ha determinado la orientación del trabajo de Tesis fundamentalmente en el empleo de receptores GPS para el diseño y construcción de arrays sísmicos inalámbricos.

En las últimas décadas se han estudiado numerosos protocolos de sincronización distribuida para las áreas de Internet y de redes de área local (LAN). Protocolos destinados a la sincronización de los relojes de cada nodo, aprovechando todos ellos la temporalización de mensajes intercambiados entre nodos [Dargie, W.; Poellabauer, C. 2010]. Entre los numerosos protocolos que han sido diseñados para mantener la sincronización en redes de ordenadores, NTP (Network Time Protocol) sobresale debido a su omnipresente despliegue, escalabilidad, robustez relacionada con fallos y autoconfiguración en grandes redes *multihop*. Sin embargo, el NTP ofrece una precisión en el rango de algunos milisegundos. La sincronización entre los hosts se realiza a través de una estructura jerárquica de servidores de tiempo, la raíz se sincroniza con UTC y en cada nivel los servidores de tiempo sincronizan los relojes de sus pares de sub-red [Mills 1991]. Sin embargo este protocolo no es utilizable en una red de sensores por su alto consumo de recursos y por la dificultad de implementarlo en una red ad-hoc. Otros de los protocolos de sincronización ampliamente usados son:

- Reference Broadcast Synchronization (RBS) [Elson, J. et al. 2002]: en este esquema de sincronización los nodos envían un mensaje a sus nodos vecinos, estos mensajes no contienen medida de tiempo explícita. Los receptores usan la llegada de estos mensajes como punto de referencia para sincronizar sus relojes. El hecho de usar la llegada de estos mensajes como referencia, elimina errores de sincronización debido a retardos producidos por el emisor

- Timing-sync Protocol for Sensor Networks (TPSN) [Ganeriwai, S. et al. 2003]: este algoritmo de sincronización mejora el protocolo RBS. Funciona en dos pasos: primero se establece una estructura jerárquica y segundo se establecen sincronizaciones por parejas. Para minimizar los tiempos de latencia durante la sincronización, se establece una marca de tiempo a nivel de la capa MAC
- Flooding Time Synchronization Protocol (FTSP) [Maróti, M. et al. 2004]: el objetivo de este protocolo es establecer la sincronización de los nodos dentro del rango del microsegundo, mejorar la escalabilidad hasta cientos de nodos y robustez frente a cambios en la topología de la red. Se diferencia de otras soluciones en que usa un único mensaje para establecer puntos de sincronización entre emisores y receptores, eliminando muchas de las fuentes de errores de sincronización

Se han desarrollado otros protocolos basados en los anteriores para mejorar algunas de sus prestaciones, como son:

- ETSP (Energy-efficient Time Synchronization Protocol) [Shahzad, K. et al. 2008], que se basa en la unión de dos de los protocolos vistos anteriormente RBS y TPSN
- DMTS (Delay Measurement Time Synchronization) [Ping, S. 2003], minimiza el tráfico de red haciendo que el uso de la transmisión de radio sea mínimo
- STSS (Secure Time Synchronization Service) [Ganeriwai, S. et al. 2005], implementa seguridad en redes que usan los anteriores protocolos

El protocolo de sincronización IEEE 1588 o Precision Time Protocol (PTP) que inicialmente fue diseñado para redes cableadas, concretamente Ethernet, surgió como una mejora del protocolo NTP, ya que asegura una precisión por debajo del microsegundo. IEEE 1588 es un protocolo diseñado para sincronizar en tiempo real los relojes de los nodos de un sistema distribuido [Edison 2005]. Se han realizado varios trabajos que demuestran la portabilidad de este protocolo hacia redes wifi haciendo alguna modificación del protocolo original [Wobschall, D. et al 2010] o mediante la incorporación de otro protocolo, Pairwise Broadcast Synchronization (PBS), diseñado para la sincronización en redes de sensores sin cables [Albu, R. et al., 2010]. Estos trabajos aseguran conseguir una precisión de sincronización de pocos centenares de nanosegundos [Cooklev, 2007].

El protocolo IEEE1588 se ha validado en sismómetros cableados submarinos mediante el diseño de un emulador de GPS empleando PTP (Precision Time Protocol) IEEE Std. 1588 con un error inferior a los 50 μ s [Del Rio 2011b] [Del Rio 2011a]. Por todo ello el IEEE Std. 1588 es

un buen candidato a ser utilizado como protocolo para la sincronización de tiempo en redes de sensores sísmicos.

La norma IEEE1588 define un protocolo que permite la sincronización precisa de relojes en redes de sensores con requisitos de microsegundo. El protocolo proporciona un mecanismo para sincronizar los relojes mediante el intercambio mensajes de temporización entre maestro-esclavo. Define y utiliza dos tipos de mensajes PTP, mensajes de eventos y mensajes generales para WSN. Los mensajes de eventos se utilizan para transmitir marcas de tiempo precisas tanto para la transmisión como para la recepción. El conjunto de mensajes de eventos son: Sync y Delay_Req, y los generales de administración son: Follow_Up y Delay_Resp. se muestra en la Figura 2.7:

- Maestro envía mensaje de sincronización al esclavo y anota tiempo t_1 en que fue enviado
- Maestro puede enviar la marca de tiempo t_1 incrustada en el mensaje de sincronización o incrustada en un mensaje Follow_Up
- Esclavo recibe el mensaje Sync y anota el tiempo de recepción t_2
- Esclavo envía un mensaje Delay_Req al maestro y anota el tiempo t_3 en el que fue enviado
- Maestro recibe el mensaje Delay_Req y anota el tiempo de recepción t_4
- Maestro transmite al esclavo la marca de tiempo t_4 insertándola en un mensaje Delay_Resp

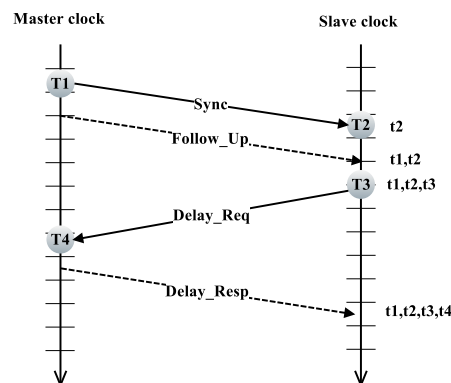


Figura 2.7. Intercambio básico de mensajes de sincronización [IEEE 1588-2008]

Al final de este proceso, el retardo entre dos nodos, y el relativo desfase de reloj, son calculados por los nodos esclavos de la siguiente manera:

$$\text{retardo} = \frac{(t_2 - t_1) + (t_4 - t_3)}{2} \quad [3]$$

$$\text{offset} = \frac{(t_2 - t_1) - (t_4 - t_3)}{2} \quad [4]$$

Al igual que en NTP, el cálculo de estos parámetros supone que los tiempos de propagación de maestro a esclavo y esclavo a maestro son iguales. Sin embargo, cualquier asimetría en el tiempo de propagación introduce un error en el valor calculado del desplazamiento del reloj. Para minimizar estos errores, la norma introduce dispositivos como límites y relojes transparentes, capaces de medir los retrasos de enlace o el tiempo de residencia.

Existe en el mercado diversa instrumentación de laboratorio para implementar el protocolo IEEE 1588 en red cableada, a título de ejemplo se pueden encontrar servidores de tiempo de la firma "meinberg", o kits de desarrollo de las empresas "conemtech", "micrel" o "imsys". En el trabajo de Tesis se han evaluado algunos de estos kits de desarrollo para implementar y testear el protocolo IEEE 1588 en laboratorio, entre ellos la plataforma Luminary Stellaris (Texas Instruments) LM3S8962/LM3S9B96 [Del Rio et al. 2013].

2.5.4 Antecedentes de redes de sensores sísmicos

Aunque no hay muchos desarrollos tecnológicos de redes de sensores sísmicos se pueden encontrar en la bibliografía algunos ejemplos aplicados a la monitorización volcánica.

En 2004 una red de sensores se usó para monitorizar el volcán Tungurahua, Ecuador [Werner-Allen, G. et al. 2005]. Los sensores utilizados fueron micrófonos para detectar señales infrasónicas generadas en el cráter por las erupciones del volcán. La red formada estuvo basada en nodos Mica2 [MICA2 2013]. Debido al gran volumen de datos a enviar, sólo se transmitían los datos de las señales que estuvieran bien correlacionadas. Uno de los nodos se encargaba de establecer la señal de tiempo para que el resto de nodos sensores estuvieran sincronizados, este nodo estaba dotado de un GPS y el método de sincronización era similar al protocolo RBS visto anteriormente. La comunicación se establecía por radio a una frecuencia de 433 MHz entre los distintos nodos, mientras que la transmisión de datos desde el nodo base al centro de recepción de datos se hacía mediante señal de 2.4 GHz.

En 2005 en el volcán Reventador, Ecuador [Werner-Allen, G. et al. 2006] se instaló un array de 16 nodos equipados con sensores sísmicos y acústicos. Cada estación consistía en un nodo Moteiv TMote Sky [TMOTE 2013], una antena de 8 dBi y 2.4 GHz, un sismómetro y un micrófono. Cada nodo poseía un algoritmo de detección de eventos, al dispararse un evento se

enviaba un mensaje al nodo central. Cuando el nodo central recibía una cantidad determinada de mensajes en una ventana temporal definida, procedía a solicitar los datos incluso de los nodos que no dispararon ningún evento. El protocolo de sincronización usado fue FTPS modificado.

Estos dos ejemplos de redes de sensores para monitorización volcánica se basan en detectar eventos y transmitirlos, de esta forma se minimiza el volumen de información y gasto energético, por contra el porcentaje de detección es muy bajo.

En 2008 se instalaron 5 estaciones sísmicas en el cráter del Mount St Helens, Estados Unidos de América [Song, W. et al. 2009]. Los nodos de esta red inalámbrica disponían de un GPS que se encargaba de medir las deformaciones y proporcionar un tiempo común a cada nodo de esta red. Los datos se transmitían de forma continua sin ningún tipo de algoritmo detección. Aunque la sincronización de esta red se hacía mediante los GPS locales de cada nodo, en el caso de que hubiera algún fallo del receptor GPS se utilizó un protocolo de sincronización que se llamó Z-SYNC, que era un híbrido que aunaba los beneficios del GPS y el protocolo FTSP. Esta red no disponía de sistema de adquisición in-situ, los datos eran transmitidos directamente limitando su autonomía de funcionamiento.

La gran utilidad de las antenas sísmicas para vigilancia volcánica [Almendros, 1999] [Werner-Allen, G. et al. 2006] y las múltiples aplicaciones de las redes de sensores sin cables [Szewczyk, R. et al. 2004] [Montero, F. et al. 2012], ha hecho que muchos grupos de investigación hayan combinado ambas ideas obteniendo buenos resultados [Werner-Allen, G. et al. 2006]. Uno de los grandes problemas no resuelto satisfactoriamente en estos desarrollos, es la sincronización temporal en los distintos nodos, desarrollándose múltiples protocolos de sincronización o modificaciones de ellos. La mejora de algunas características ha llevado a la aparición de otros problemas:

- El hecho de usar redes sin hilos supone que el desarrollo vaya encaminado a minimizar el consumo y por tanto a la creación de algoritmos para la detección de eventos [Werner-Allen, G. et al. 2006] que en un alto porcentaje no se detectaron
- La transmisión continua de datos permite el análisis en el centro de recepción de datos [Song, W. et al. 2009] lo que supone un consumo enorme del ancho de banda que aumentará en proporción al crecimiento de la red por la incorporación de nuevos elementos.

Es objetivo de este trabajo de Tesis disponer de estaciones sísmicas independientes con capacidad de almacenamiento de datos y que en un momento determinado puedan formar parte de una red sísmica inalámbrica, siendo el procesado in situ de las señales de interés para obtener una localización en tiempo real y transmitirla utilizando un ancho de banda mínimo.

Este procesado, que da una localización en tiempo real, es importante en una situación en la que no se puede determinar donde se encuentra el centro eruptivo, como por ejemplo en el caso de una erupción submarina [Abella, R. et al. 2012].

Hemos visto que múltiples factores no permiten lograr un tiempo idéntico en todos los nodos de la red de una manera simple. Además los nodos de sensores inalámbricos están limitados en términos de consumo de energía, procesamiento y memoria. Por lo tanto, muchos métodos de sincronización tradicionales no se pueden utilizar en WSN. Dado que la transmisión y recepción de paquetes constituyen un importante consumo de energía en un nodo de sensor, se evitarán frecuentes intercambios de mensajes de sincronización. Por otro lado hemos visto que los cristales de reloj de gama baja introducen cantidades significativas de deriva, lo que puede conducir a la necesidad de frecuentes sincronizaciones. La sincronización requiere que los nodos se comuniquen entre sí para intercambiar información de reloj. Si bien esta comunicación suele ser trivial en redes cableadas como Internet, las WSN requieren una comunicación inalámbrica entre nodos, lo que crea desafíos adicionales para la sincronización como resultado de la comunicación propensa a errores y retrasos no determinísticos.

Capítulo 3

Sistemas de adquisición multiparamétricos para monitorización volcánica

En este capítulo se describe el desarrollo de los diferentes sistemas de adquisición multiparamétricos de bajo coste para monitorización volcánica aplicables a gravimetría, geodesia y sísmica, así como también al seguimiento visual de la actividad volcánica. Donde la sincronización de tiempo de los diferentes equipos se hará a través del protocolo Network Time Protocol (NTP), salvo para el caso de la sísmica, que requiere una sincronización más precisa y por tanto se hará con ayuda de GPS. Los equipos desarrollados a partir de un dispositivo con Linux embebido utilizan el NTP ya implementado en el propio sistema operativo. Sólo en el caso de las aplicaciones que no utilizan Linux como sistema de comunicaciones se ha tenido que implementar todo el protocolo de sincronización NTP.

En este trabajo de Tesis los primeros desarrollos se realizaron para la medida de parámetros "lentos": gases volcánicos, temperatura, presión, humedad, etc. [Moure, D. et al 2013]. Para ello se diseñó y construyó un sistema de adquisición de 3 canales analógicos y un contador, empleando el convertidor AD7706 y la referencia de tensión REF192 (ambos de Analog Devices) con un reloj de tiempo real PCF8583 (de NXP semiconductors) y un PIC18F2620 de MICROCHIP. Los datos se registran en una tarjeta SD (Secure Digital) y se descargan directamente del equipo, puesto que su uso iba a ser principalmente para equipos instalados en galerías a cientos de metros de profundidad, con el fin de realizar la medida antes de que los gases se difundan en la atmósfera. En el caso de instrumentación que no fuera a ser instalada en galerías, para poder enviar los datos en tiempo real se sustituyó el

microcontrolador por un mini ordenador con Linux embebido, donde las líneas de comunicación SPI, I2C e I/O se conectaron a los pines correspondientes de éste. Posteriormente, en este entorno Linux se ha desarrollado una página web, control de la transmisión de datos, cálculos, etc.

El equipo construido se ha realizado empleando un *system on chip* (SoC) de Broadcom BCM2835 con sistema operativo Linux (basado en Debian™) que permite la construcción de un completo sistema de monitorización, ofreciendo múltiples posibilidades en cuanto a almacenamiento, procesamiento de datos, configuración y seguimiento en tiempo real de la actividad volcánica. El sistema de adquisición multiparamétrico presentado se complementa con el desarrollo de un entorno software para esta plataforma, además de distintos módulos hardware acondicionadores según el parámetro a monitorizar. El sistema de adquisición multiparamétrico ha sido aplicado y validado en la monitorización de: mareas oceánicas, deformación del terreno, gravedad y monitorización a través de imágenes en la isla de Tenerife y deformación del terreno en la isla de El Hierro.

3.1 Sistema de adquisición de bajo coste con Linux embebido.

Primer desarrollo

3.1.1 Equipamiento: Controladora y sensores

El sistema diseñado se ha basado en un ordenador tamaño tarjeta de crédito (credit-card sized) caracterizado por múltiples protocolos de comunicación orientados a microcontroladores: Inter Integrated Circuit (I2C), Serial Peripheral Interface (SPI), Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (UART); así como otros protocolos de comunicación externos al equipo como: Universal Serial Bus (USB) y ETHERNET. Así, gracias a las mencionadas prestaciones se ha desarrollado un sistema de adquisición de datos específico con 16 bits de resolución y bajo ruido [Raspberry Pi 2015]. El sistema de adquisición dispone de un reloj en tiempo real para situaciones en las que no se disponga de tiempo GPS o no se pueda hacer uso del protocolo NTP por falta de conectividad. El diseño hardware se ha completado con diferentes aplicaciones de software para el control, visualización, almacenamiento y representación de datos. Con el fin de poder realizar un seguimiento de la actividad en cualquier parte e instante, el uso de un sistema embebido Linux nos ha permitido configurar y

visualizar los datos que se están registrando en tiempo real, a través de una página web y de un software de mensajería instantánea.

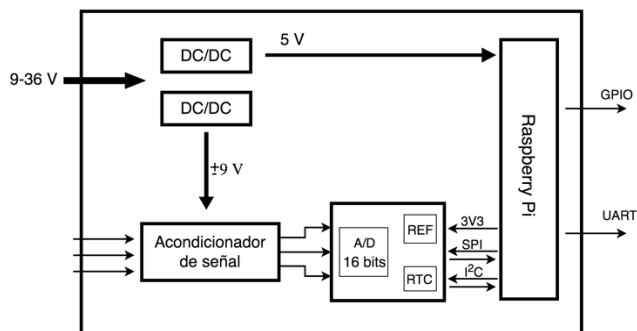


Figura 3.1. Esquema general del sistema de adquisición

La función básica del sistema desarrollado es la adquisición de datos analógicos de 16 bits y su posterior almacenamiento, transmisión y visualización. El tiempo de muestreo, el número de canales a adquirir, y otro tipo de información referente al parámetro que se esté midiendo, se configura principalmente desde una página web desarrollada a tal efecto.

Para el desarrollo del sistema de adquisición de datos se ha utilizado el microordenador RaspberryPi™ [Arduino, 2015] (Anexo A. Tabla A.1), que usa procesador ARM™ embebido, con sistema operativo Raspbian (basado en Debian Linux), elegido por su bajo coste y consumo. Debido a que soporta distintos sistemas operativos GNU/Linux, es ideal para el desarrollo de un sistema de medida en tiempo real, ya que se pueden implementar fácilmente aplicaciones sobre múltiples protocolos de comunicación como User Datagram Protocol (UDP), Transmission Control Protocol (TCP), File Transfer Protocol (FTP), así como Secure Shell (SSH) y Secured File Transfer Protocol (SFTP). La programación realizada con lenguajes de alto nivel, facilita desarrollar aplicaciones para la explotación de datos.

El sistema de adquisición básicamente se compone de un conversor A/D de 16 bits y bajo ruido de *Analog Device* y un reloj en tiempo real (RTC) de *NXP Semiconductors*. El reloj en tiempo real es necesario puesto que el sistema toma el tiempo de la propia red de Internet mediante el protocolo NTP, en caso de que no haya conectividad debe proporcionarse el tiempo por medio del RTC. Debido al uso de diferentes sensores, se ha desarrollado la correspondiente electrónica de acondicionamiento de señal, para adaptarlos al circuito de adquisición ajustando la señal a medir al rango de entrada del conversor A/D para luego filtrarla (Figura 3.1).

Las magnitudes medidas y los sensores empleados han sido:

- **Medida de gravedad**

El sensor utilizado para completar el sistema de gravimetría es de *LaCoste & Romberg* (LCR) modelo G (Anexo A. Tabla A.2). Su principio de medida es el movimiento de una masa suspendida de un resorte. La estructura del gravímetro es metálica, lo que le da gran robustez, pero con el inconveniente de sufrir expansiones y contracciones debido a los cambios de la temperatura, por lo que debe estar termostatzado. La masa, a diferencia del resto de la estructura, es de cuarzo, que es menos sensible a la temperatura. El LCR-G es un gravímetro relativo, no determina la gravedad de manera absoluta con una lectura, si no que proporciona el valor de la diferencia de gravedad entre observaciones en localizaciones diferentes o en un mismo lugar en instantes distintos.

Debido a la influencia de las condiciones meteorológicas sobre el propio gravímetro y sus medidas, se ha utilizado una estación meteorológica desarrollada en este trabajo de Tesis, para hacer un seguimiento de las condiciones atmosféricas (Anexo A Tabla A.3). La estación de bajo coste y consumo, está equipada con sensores digitales de temperatura, humedad y presión (Anexo A Tabla A.4), la comunicación la realiza el microcontrolador ATMEGA328 a través de dos protocolos serie I2C (Presión + temperatura) y pseudo I2C (Humedad + temperatura). Tras realizar la adquisición, el dato es almacenado en su propia memoria y lo transmite a través de la UART al sistema del gravímetro, estos datos también se almacenan localmente en la tarjeta de memoria y su tiempo de adquisición es programable.

- **Sistema de medida de deformación del terreno**

El sensor utilizado para completar el sistema de medida de deformación de la tierra, es el modelo 701-2 de *Jewell Instruments* (Anexo A tabla A.5). El inclinómetro construido es de gran sensibilidad, bajo consumo y dispone de tres salidas analógicas, una para un sensor de temperatura y las otras dos para los ejes NS y EW. Este tipo de inclinómetros contienen dos sensores de nivel electrolíticos, uno para cada eje, que producen un cambio en la resistencia en respuesta a una rotación del sensor. Esta resistencia se mide en un Puente de Wheatstone, la señal luego es amplificada de tal forma que pueda ser adquirida externamente. Los dos sensores se disponen de forma ortogonal, de tal forma que la suma vectorial de la salida de ambos canales, da la dirección y magnitud de la rotación con respecto al vector gravedad. El sensor de temperatura, instalado en la base junto a los sensores de inclinación, permite evaluar los efectos de los cambios de temperatura sobre la estructura en la que está instalado el inclinómetro. Aunque son programables los intervalos de muestreo, el sistema de adquisición

toma muestras cada segundo, haciendo la media aritmética cada minuto. De esta forma se realiza un filtrado de señal, mejorando la relación señal-ruido.

- **Sistema de medida de mareas oceánicas**

El sensor utilizado para la medida de mareas oceánicas es el modelo SEBAPuls 30 de *SEBA Hydrometrie* (Anexo A Tabla A.6). Es un sensor no intrusivo para la medida de alta precisión del nivel de agua. Su funcionamiento se basa en la emisión de una señal pulsada en la banda de microondas de 26 GHz, de tal forma que en el tiempo que no se transmite la señal pulsada está esperando las ondas que se reflejan en la superficie del agua. Tras recibir la señal rebotada en la superficie del agua, el sensor calcula la distancia entre éste y la lámina de agua.

- **Sistema de monitorización a través de imágenes**

Se ha realizado utilizando una cámara comercial (Tabla A.7), desarrollada específicamente para la plataforma Raspberry Pi, de bajo coste y que puede ser implementada sobre cualquier sistema de los mencionados anteriormente puesto que su interfaz es independiente del resto. El interfaz de la cámara es CSI (Camera Serial Interface), una especificación de MIPI (Mobile Industry Process Interface alliance), organización que a su vez desarrolla especificaciones de interfaz para móviles.

3.1.2 Entorno de programación

El software desarrollado es un conjunto de programas en C, PHP, HTML, JAVA, JavaScript, LUA y scripts de la Shell Bash de Linux. Estos programas utilizan como herramienta otras aplicaciones de software libre como: Gnuplot [Gnuplot 2015] para realizar representaciones gráficas de los distintos parámetros; ImageMagick [Imagemagick 2015] para la edición de imágenes; libav [Libav 2015] para la edición de video; Apache [Apache 2015], servidor de páginas web; Telegram CLI [Telegram-cli 2015] programa de mensajería instantánea para el control y configuración de los distintos sistemas. La ejecución de la mayoría de los programas desarrollados se ha realizado mediante *cron* de Linux, que es un administrador de procesos en segundo plano y que ejecuta procesos a intervalos regulares, siendo estos intervalos programados según el tipo de aplicación.

Los programas desarrollados se dividen en dos bloques: programas relativos a los sistemas de adquisición de datos (inclinómetro, mareógrafo y gravímetro) y los relativos al sistema de toma de imágenes.

Los programas y scripts relativos al sistema de adquisición han sido: *main.c*, *graph.sh*, *synch.sh*, *meteo.c*, *message.lua*, *index.php* (Tabla 3.1) tienen un ciclo de vida corto, una vez que cumplen su cometido finalizan hasta su siguiente ejecución.

Software/Script	Ejecución cada
<i>main.c</i>	1 minuto por defecto
<i>graph.sh</i>	1 minuto
<i>synch.sh</i>	30 minutos
<i>meteo.c</i>	Continuo
<i>message.lua</i>	Continuo
<i>index.php</i>	Continuo

Tabla 3.1. *Software del sistema de adquisición de datos.*

El programa principal *main.c* (Figura 3.2), realiza la adquisición de los datos analógicos: toma el dato, la hora en la que es adquirido y lo almacena. El almacenamiento se realiza en una memoria externa USB (Universal Serial Bus), con una estructura de carpetas anidadas donde se especifica primero el equipo (gravímetro, estación meteorológica, inclinómetro o mareógrafo), siguiendo en subcarpetas el año y el mes, dentro de esta última se almacenan ficheros diarios. Este software hace uso de las curvas de calibración de cada sensor, almacenando en distintos ficheros el dato en bruto y el dato en sus unidades correspondientes. Las curvas de calibrado están disponibles en un fichero que el software de adquisición consulta en cada medida.

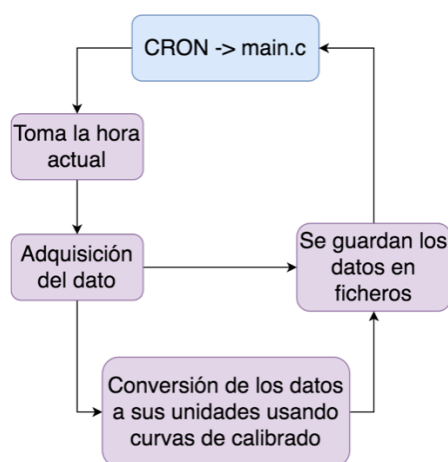


Figura 3.2. *Diagrama de flujo de la aplicación main.c*

Mediante *synch.sh*, que se ejecuta cada 30 minutos, los datos almacenados son copiados íntegramente y de forma periódica a un ordenador remoto, manteniéndose la misma

estructura de almacenamiento que existe en la memoria externa del equipo. Esta copia periódica es configurable, así como la dirección del servidor a la que se quieren enviar. La transferencia de los datos se realiza mediante la aplicación *rsync* de Linux sobre el protocolo SSH, que permite hacer un espejo de carpetas y ficheros en el ordenador remoto. La ventaja de usar esta forma de transmitir los datos es que minimiza su volumen puesto que hace uso del algoritmo *delta encoding* [Tridgell, A. 1999], cuyo objetivo es obtener solamente los bytes que han sido modificados desde la última versión del archivo.

Los datos generados por la estación meteorológica son enviados cada minuto, desde la plataforma ArduinoTM, a través de la UART. El programa *meteo.c* se encarga de recibirlos, darles hora y almacenarlos en la unidad USB según la estructura de ficheros comentada con anterioridad.

El script *graph.sh* (Figura 3.3) realiza la representación de los datos que se van adquiriendo, utilizando como herramienta la aplicación *Gnuplot*, que es una utilidad para generar gráficos por medio de línea de comandos y cuya salida es directamente un fichero del tipo pdf, png, gif, jpg, etc. Este script se ejecuta una vez cada minuto y su función es tomar los datos de un periodo determinado y representarlos con la ayuda de Gnuplot. La salida de este software, que es una imagen png, es copiada a la ruta donde está alojada la página web. El periodo de datos a representar es configurable por el usuario debido a que este script consulta un fichero de configuración, antes de realizar la representación.

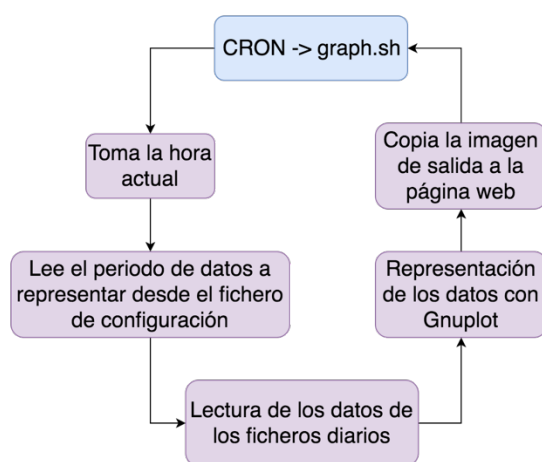


Figura 3.3. Diagrama de flujo del script *graph.sh*

Tanto la configuración del equipo, como la visualización de los datos adquiridos en tiempo real, se realiza a través de una página web programada en PHP (Hypertext Preprocessor), y protegida con contraseña para evitar posibles modificaciones no permitidas de la configuración del sistema. Los apartados que se han de configurar a través de la página web son: nombre de la estación, número de serie del sensor, selección de los canales a adquirir y periodo de muestreo. En el caso de que se desee transmitir los datos, se debe activar el

apartado relativo a la transmisión y configurar el servidor, el puerto y la carpeta remota donde se deseen guardar. Opcionalmente pueden añadirse las coordenadas de la estación (latitud, longitud y altitud). Otra parte de la configuración, como son las curvas de calibrado relativas al sensor, no se realiza directamente sobre la página web por seguridad. Se debe realizar accediendo mediante SSH al sistema y modificando el fichero correspondiente. Si no se desea que los datos sean transmitidos, también pueden ser descargados directamente de la web.

La información se presenta en la página web, tanto numérica como gráficamente. Por una parte se presentan las gráficas de los últimos días de todos los parámetros que se están midiendo (Figuras 3.4 y 3.5). Por otro lado se ofrece información de los datos adquiridos, mostrando la fecha, la hora y el valor más reciente, así como una pequeña estadística de los datos del día en curso, dando el mínimo, máximo y la diferencia entre ellos (Figura 3.6). Los ficheros de configuración generados en la página web son usados por los distintos subprogramas mencionados en la Tabla 3.1.

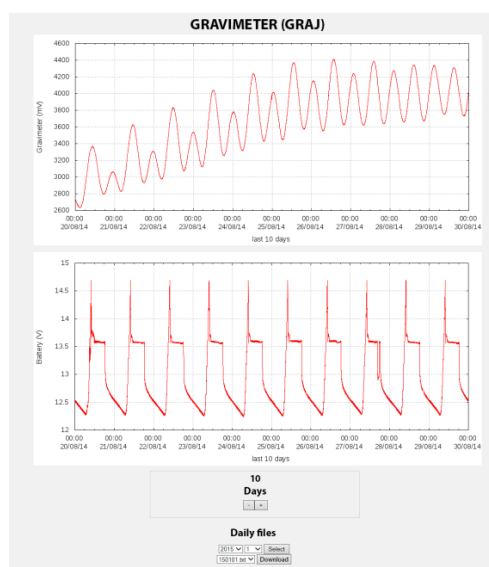


Figura 3.4. Sección de la página web correspondiente a la medida del gravímetro y control de la batería. Las unidades de los parámetros son mV y V respectivamente. Se representa un periodo de 10 días.

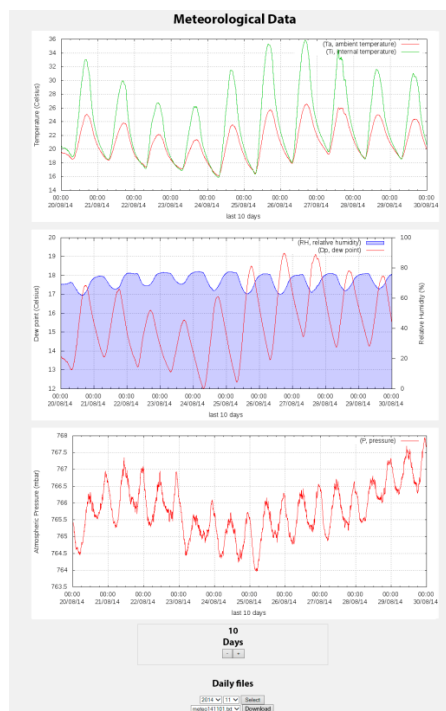


Figura 3.5. Sección de la página web correspondiente a los datos meteorológicos del equipo de gravimetría. Se representa un periodo de 10 días, primero la temperatura ambiente e interna del equipo, a continuación la humedad relativa y el punto de rocío, y finalmente la presión atmosférica.

Configuration		Information																																									
Gravimeter Station Name: <input type="text" value="GRAJ"/> Channel Selection: <input checked="" type="radio"/> CANAL 1 <input type="radio"/> CANAL 2 <input checked="" type="radio"/> CHANNEL 3 Sample (minutes): <input type="text" value="0.5"/> Geographic Location LAT: <input type="text" value="28.264871"/> LON: <input type="text" value="-16.596884"/> ALT: <input type="text" value="2500m"/> Remote Server <input checked="" type="checkbox"/> Server: <input type="text" value="88.2.24"/> Port: <input type="text" value="2222"/> Folder: <input type="text" value="/home/svvcog/gravim"/> <input type="button" value="Enviar"/>		Current Data Gravimeter Date: 31/08/14 00:20:30 ch1 (mV): -158.54 ch2 (mV): ? ch3 (V): 14.15 Meteo Date: 31/08/14 00:20 ambient temperature (°C): 5.31 internal temperature (°C): 14.30 Relative Humidity (%): 81.08 dew point (°C): 2.32 atmospheric pressure (mbar): 763.89 Statistics <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th colspan="3">Gravimeter</th> </tr> <tr> <th></th> <th>Min</th> <th>Max</th> <th>Dif</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ch1 (mV)</td> <td>-10000.00</td> <td>-10000.00</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>ch2 (mV)</td> <td>?</td> <td>?</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>ch3 (V)</td> <td>11.69</td> <td>14.69</td> <td>3.00</td> </tr> <tr> <td>Ta (°C)</td> <td>13.16</td> <td>14.99</td> <td>1.83</td> </tr> <tr> <td>Ti (°C)</td> <td>7.97</td> <td>12.00</td> <td>4.03</td> </tr> <tr> <td>HR (%)</td> <td>54.42</td> <td>58.72</td> <td>4.30</td> </tr> <tr> <td>Pr (°C)</td> <td>5.15</td> <td>6.03</td> <td>0.88</td> </tr> <tr> <td>P (mbar)</td> <td>750.17</td> <td>752.53</td> <td>2.36</td> </tr> </tbody> </table>			Gravimeter				Min	Max	Dif	ch1 (mV)	-10000.00	-10000.00	0.00	ch2 (mV)	?	?	0.00	ch3 (V)	11.69	14.69	3.00	Ta (°C)	13.16	14.99	1.83	Ti (°C)	7.97	12.00	4.03	HR (%)	54.42	58.72	4.30	Pr (°C)	5.15	6.03	0.88	P (mbar)	750.17	752.53	2.36
	Gravimeter																																										
	Min	Max	Dif																																								
ch1 (mV)	-10000.00	-10000.00	0.00																																								
ch2 (mV)	?	?	0.00																																								
ch3 (V)	11.69	14.69	3.00																																								
Ta (°C)	13.16	14.99	1.83																																								
Ti (°C)	7.97	12.00	4.03																																								
HR (%)	54.42	58.72	4.30																																								
Pr (°C)	5.15	6.03	0.88																																								
P (mbar)	750.17	752.53	2.36																																								

Figura 3.6. Sección de la página web donde se muestra la configuración e información del equipo de gravimetría. Se muestran, a la izquierda, los datos de configuración, a la derecha, información del sistema relativa al gravímetro, batería y datos meteorológicos.

Como se ha indicado anteriormente la mayoría del software desarrollado es ejecutado por el sistema cada cierto tiempo programado, pero también hay programas que se ejecutan en el arranque del sistema, como es el caso de la adquisición de los datos meteorológicos y la aplicación de mensajería instantánea (Telegram-CLI).

Telegram-CLI es un cliente de Telegram Messenger [Telegram Messenger 2015], no oficial, para la plataforma Linux. Mediante el uso de scripts en lenguaje *Lua* se puede interactuar con el software de mensajería, enviar y recibir texto, imágenes y video. Además, podemos configurar y consultar el estado de los distintos equipos. El script *message.lua* (Tabla 3.1) hace la función de robot, contestando a comandos que se le envíen a través del programa de mensajería, como solicitudes de información de la estación que pueden ser imágenes, video o texto. Los comandos son recibidos por todas las estaciones, pero debido a que los equipos miden parámetros distintos y están instalados en diferentes ubicaciones, cada uno de ellos contará con un script específico para los parámetros que mida. Para conocer la conectividad de cada equipo, existe un comando general *HELP*, que es ejecutado por todos, en el que la respuesta es el nombre de la estación seguido de *ONLINE*. Para conocer los comandos que admite cada estación basta con escribir su nombre (Tabla 3.2). En la Figura 3.7 se muestra un ejemplo del acceso a las distintas estaciones mediante el software de mensajería instantánea.

Comando	Tipo	Respuesta	Responde
HELP	General	<name> ONLINE	Todos
<name>	Específico	Lista los comandos admitidos por el equipo	Todos
CRAJI	Específico	Envía la última imagen capturada	Cámara CRAJ
CRAJL	Específico	Envía una lista de los timelapses	Cámara CRAJ
RGRAVV	Específico	Envía la gráfica de la gravedad	Gravímetro GRAJ
RBAT	Específico	Envía la gráfica de las baterías	Gravímetro GRAJ
ITIGXY	Específico	Envía la gráfica de la deformación	Inclinómetro ITIG
IRIOXY	Específico	Envía la gráfica de la deformación	Inclinómetro IRIO

Tabla 3.2. Algunos de los comandos admitidos por los distintos equipos. Los comandos generales son contestados por todos los equipos.

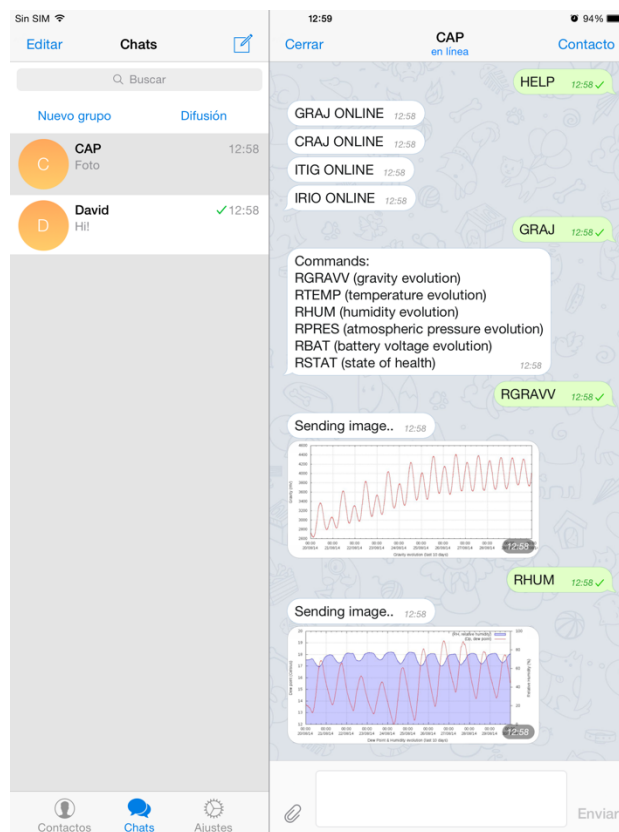


Figura 3.7. Consulta del estado de las distintas estaciones, en tiempo real, a través de la aplicación de mensajería instantánea Telegram. Primero se pide el estado de las estaciones mediante el comando general *HELP* y luego se especifica la estación a la que se quiere acceder, en este caso *GRAJ*. Tras recibir este comando, contestará con el resto de comandos disponibles para esa estación. En este ejemplo se solicita la gráfica de gravedad y de humedad de los últimos diez días.

Hasta ahora se ha descrito el software de los sistemas de adquisición de datos. A continuación se explica el funcionamiento del sistema de monitorización mediante imágenes, con un funcionamiento similar. Cuenta con una serie de programas ejecutados mediante *cron* y otros que se ejecutan en el arranque del sistema (Tabla 3.3).

Software/Script	Ejecución cada
timelapse.c	1 minuto por defecto
battery.c	1 minuto
bat_graph.sh	1 minuto
video.sh	1 vez al día
synch.sh	1 minuto
buffer.sh	1 vez al día
message.lua	continuo
index.php	continuo

Tabla 3.3. Software del sistema de monitorización por imágenes

El software *timelapse.c* es el responsable de la toma de imágenes. Cuando se ejecuta, toma la hora UTC del momento actual, adquiere la imagen e imprime la hora sobre esta. Posteriormente guarda la imagen en una memoria externa USB, luego la reduce y la copia en la ruta de la página web. El script *sync.sh* es el responsable de realizar la copia de imágenes a un servidor remoto, como se ha explicado con anterioridad. El script *buffer.sh*, ejecutado una vez al día, verifica que el tamaño en disco ocupado por las imágenes no es superior a la capacidad de la memoria, de tal forma que borra las más antiguas, estableciendo por tanto un buffer circular de imágenes. El script *video.sh*, ejecutado una vez al día, es el responsable de realizar un montaje de video de todas las imágenes del día en curso y almacenarlo en memoria. En realidad, realiza dos videos, uno en baja calidad para la descarga a través de dispositivos móviles y otro en alta calidad para la descarga a través de la página web. Dado que el sistema se basa en el esquema de la Figura 3.1, se ha usado uno de los canales analógicos para llevar un control de la batería del sistema mediante el software *battery.c*, que va adquiriendo y guardando el valor de la batería continuamente, almacenándolo en la memoria externa. El script *bat_graph.sh*, hace una representación gráfica de los datos de batería que luego copia en la ruta de la página web, siguiendo el mismo diagrama de flujo de la Figura 3.3.

La configuración del equipo, así como información diversa sobre la estación, se realiza a través de la página web desarrollada a tal efecto (Figura 3.8). Los apartados que se han de configurar son: nombre de la estación; intervalo de toma de imágenes; tamaño del buffer de almacenamiento, en días; dirección del servidor, puerto y carpeta del ordenador remoto en el caso de que se desee transmitir las imágenes, y por último, su localización geográfica.

Por otro lado, la información a la que se puede acceder en la web es: última imagen tomada por la cámara; gráfica de la evolución del voltaje de la batería de los últimos seis días; capacidad de la memoria externa; porcentaje de uso de esta memoria y valor actual del voltaje de la batería. También, en esta web, pueden descargarse las imágenes tomadas en alta calidad, así como los videos generados hasta la fecha.

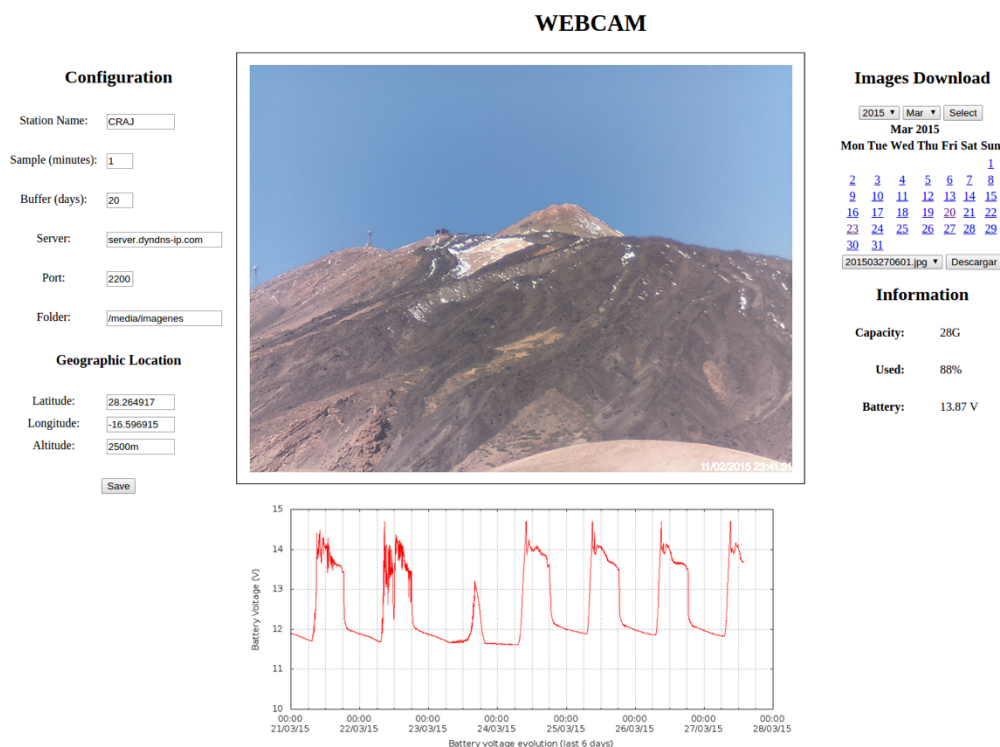


Figura 3.8. Sección de la página web del sistema de monitorización visual. Se observa a la izquierda, la configuración del sistema. En el centro la imagen más reciente tomada y una gráfica de la evolución de la batería. A la derecha se tiene diversa información del sistema, así como la opción de descarga de imágenes con la ayuda de un calendario.

Las imágenes son tomadas a intervalos de tiempo programables, entre 1 y 59 minutos. Si se desea, pueden ser enviadas a un ordenador remoto o descargadas desde la propia web. Paralelamente se va adquiriendo y representando el voltaje de la batería cada minuto, así como actualizando la información relativa a la capacidad del dispositivo. El sistema puede funcionar de distintas formas, aunque el modo por defecto es la toma de imágenes desde la salida a la puesta de sol, realizando un timelapse al final del día, que puede ser descargado desde la propia página web.

En este tipo de aplicaciones de monitorización a través de imágenes, el software de mensajería instantánea juega un papel muy útil, puesto que puede descargarse la última imagen tomada por medio de un comando, así como descargar un video que representa la suma de las imágenes tomadas durante todo el día, siendo así muy fácil y rápida la revisión diaria de las imágenes (Figura 3.9).

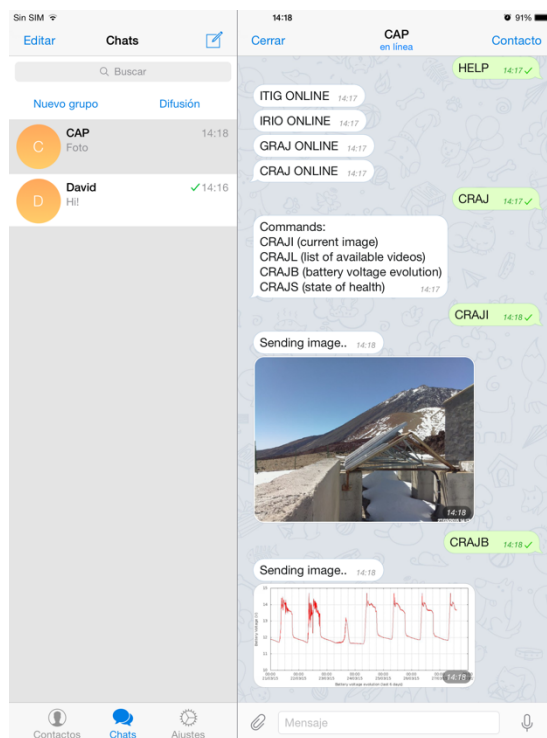


Figura 3.9. Consulta del estado de las distintas estaciones a través del software de mensajería instantánea Telegram utilizando un smartphone. Posteriormente se solicita la última imagen tomada mediante el comando *CRAJI* y seguidamente se comprueba el estado de las baterías con el comando *CRAJB*.

3.2 Sistema de adquisición de bajo coste con Linux embebido.

Robustez del Sistema

Tras las primeras pruebas de campo, cuyos resultados se presentan en el capítulo de resultados, de cara al desarrollo de un sistema para la adquisición de datos sísmicos robusto y fiable, manteniendo el funcionamiento del entorno web descrito en el apartado anterior, el trabajo se focalizó al empleo del sistema como nodo de un array sísmico.

Siguiendo los objetivos iniciales del trabajo de Tesis, las principales líneas de actuación han sido:

- Reducir el consumo: para aquellas zonas en las que se miden parámetros lentos y que no requieren un sistema complejo para el envío de los datos

- Mejorar sincronización: el hecho de que un sistema operativo tenga la misión de tomar el dato en un instante determinado puede comprometer la medida, debido a que su ejecución está a merced de las tareas que esté ejecutando en ese momento. Los retardos en la toma del dato pueden ser fatales en un sistema de alta frecuencia de muestreo, como son las medidas en sísmica
- Mejora en la resolución de la medida: de cara a realizar medidas de señales de pequeña amplitud, siempre intentando reducir el ruido electrónico, se empleará un digitalizador de 24 bits
- Mejora en el número de canales: un aumento del número de canales analógicos y digitales permite centralizar todas las medidas en un único sistema

Para lograr las mejoras propuestas el microcontrolador debe ser capaz de realizar las medidas en el instante requerido, transmitir los datos de forma local o remota y tener bajo consumo. Así mismo debe disponer de:

- Un sistema de archivos completo: sistema que almacene los datos en ficheros horarios o diarios localmente en una tarjeta SD para luego ser transmitidos. Estos ficheros disponen de la hora creación y modificación.
- Una interfaz (tipo Shell de Linux) que permita la configuración del sistema, tanto de la adquisición de los datos como de las comunicaciones
- Un formato de datos que permita su fácil explotación

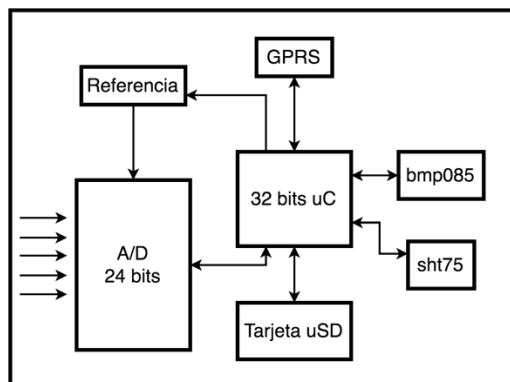


Figura 3.10. Esquema general del sistema de adquisición con microcontrolador específico para la adquisición de los datos

El microcontrolador utilizado ha sido el PIC32MX450F256H de 32 bits (Microchip), que dispone de un RTC interno. El convertor A/D ha sido el AD7714 de la firma Analog Devices. El esquema hardware utilizado en este desarrollo (Figura 3.10) es muy similar al original (Figura

3.1) donde la parte analógica y digital se encuentran aisladas. Debido a los buenos resultados en cuanto a relación señal/ruido que proporcionó, la parte analógica es la misma que la de la primera versión (Figura 3.11).

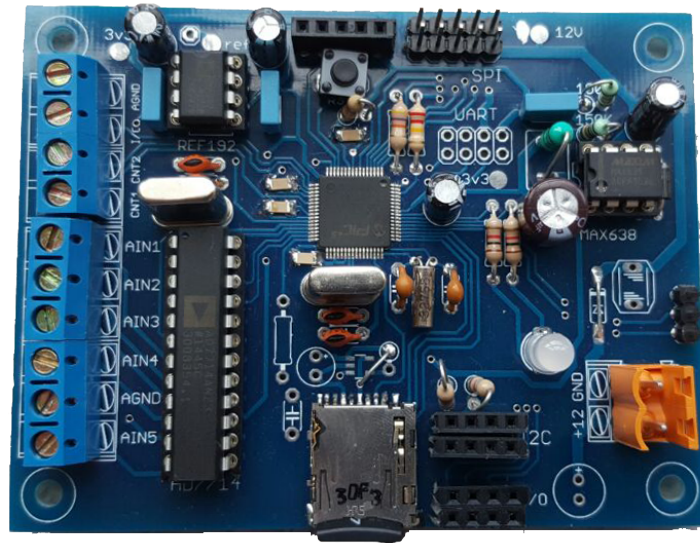


Figura 3.11. Sistema de 24 bits, 5 canales y tarjeta SD

En este desarrollo toda la responsabilidad sobre la medida la gestiona el microcontrolador PIC32MX450F256H, mientras que el computador de placa reducida, Broadcom BCM2835 con Linux embebido, sigue realizando el resto de sus funciones, que son la presentación de los datos y comunicaciones. El desarrollo (Figura 3.11) se conecta mediante un puerto serie al mini ordenador, o podría funcionar de forma independiente. En este último caso, se ha testado transmitiendo datos a través de la red GSM, utilizando un módulo SIM900A de la firma SIMCOM.

El firmware desarrollado se ha diseñado específicamente para que el consumo sea mínimo, permitiendo a su vez la transmisión de los datos usando el conjunto de comandos Hayes (también llamados AT) que se le envían al dispositivo de comunicaciones, permitiendo establecer una comunicación TCP con el servidor en el centro de datos. En el servidor se dispone de un software que recibe los paquetes enviados, que son chequeados mediante un algoritmo de suma de verificación, de tal forma que si el paquete sufre algún daño, se retransmitirá. La hora del sistema es actualizada continuamente, después de cada envío de datos, realizará una conexión TCP a un servidor de tiempo utilizando el protocolo NTP, suponiendo que haya conectividad.

En la primera versión, el microordenador (Raspberry Pi) copiaba los datos a una carpeta remota. En este segundo desarrollo se puede seguir usando el mismo microordenador, copiando remotamente los datos de la misma forma o bien usar un módulo de comunicaciones específico que utilice comandos Hayes o AT, prescindiendo del microordenador y reduciendo por tanto el consumo. En este último caso, debe existir un software en el servidor que reciba los paquetes de datos y compruebe su integridad.

```
GDT24 VERSION 1.0
Datalogger de 5 canales de 24 bits y dos contadores,
Medida de temperatura y humedad relativa (SHT75) y presión (BMP085)
Almacenamiento en SD

Estacion:ARRA0
Canales Activos: ninguno
Contadores Activos: ninguno
Muestreo: 00:10:00
Oversampling: ON
Resolución: 24 bits
Calentamiento: OFF
Estacion Meteorologica: ON
Sensor de presión bmp085
Sensor de humedad sht75
>
```

Figura 3.12. Breve resumen de la configuración del equipo a través de un terminal.

La configuración del equipo se realiza a través de un terminal con comandos (Figura 3.12), pudiéndose programar los canales analógicos y digitales a utilizar, el tiempo de muestreo, calentamiento de sensores, sobre muestreo, curvas de calibrado, etc. Cuando se utiliza la red GSM, permite configurar la IP y puerto de destino, así como también la IP y puerto del servidor de tiempo (Figura 3.13).

```
Configuracion de la adquisicion
Modo de uso:

Configuracion datalogger:
config read -> configuracion actual del sistema
config name nombre -> configura el nombre de la estacion
config channels x,x,x,x,x -> configura los canales 1 o 0
config counters x,x -> configura los contadores 1 o 0
config sample hhtwss -> configura el muestreo
config oversampling x -> activa o desactiva el sobremuestreo por canal (FPB)
config wup x -> configura precalentamiento 1 o 0
config warmup hhtwss -> configura el tiempo de precalentamiento
config resolution x -> configura resolución en bits 16 o 24
config meteo bmp085 x -> activa o desactiva el sensor de presión 1 o 0
config meteo sht75 x -> activa o desactiva el sensor de humedad 1 o 0
config factor bateria x -> configura el factor de escala de la bateria
config validate -> guarda la configuracion

Configuracion curvas de calibrado:
config calib create -> crea una plantilla del fichero de calibracion
config calib read -> curvas de calibracion sin validar
config calib cy:ax+b -> configura la curva de calibrado 'y' con formato ax+b
'y' toma el valor del canal de 1 a 5
config calib validate -> guarda las nuevas curvas de calibracion

Descarga de datos:
download analog last -> descarga la ultima sesion de los canales analogicos
download meteo last -> descarga la ultima sesion de la estacion meteorologica
download meteo all -> descarga todas las medidas de la estacion meteorologica

Configuracion comunicaciones:
config wireless x -> activa o desactiva la comunicacion movil 1 o 0
config apn xxx -> configura el nombre del apn
config user xxx -> configura nombre de usuario
config pass xxx -> configura el password
config target ip xxx.xxx.xxx.xxx -> ip de destino
config ip port xxx -> puerto de destino
config ntp ip xxx.xxx.xxx.xxx -> ip servidor ntp

Otras:
time sync -> sincroniza reloj con servidor NTP
test gsm -> nivel y calidad de la señal
test ping -> comprueba el servidor remoto
send at command comando -> ejecuta un comando at, usar sin comillas
>
```

Figura 3.13. Ejemplo de terminal de configuración del sistema de adquisición.

3.3 Valoración del sistema de medida desarrollado

En este capítulo se han explicado los sistemas de adquisición de datos de diferentes parámetros ambientales para monitorización volcánica que se han desarrollado, y cuyos resultados experimentales se muestran en el capítulo 5. Será posible registrar diferentes precursores de actividad volcánica, gracias al equipamiento que se ha diseñado siguiendo las siguientes pautas:

1. Estudio de los diferentes parámetros físico-químicos utilizados en monitorización volcánica para realizar un correcto seguimiento de su actividad.
2. Evaluación de las prestaciones de los equipos diseñados y/o comerciales utilizados y su caracterización experimental en el laboratorio
3. Hacer interactuar toda una serie de herramientas de software libre para poder acceder de un modo sencillo a la programación remota de estaciones de monitorización
4. Implementación de herramientas software que permite la explotación de datos utilizando las últimas tecnologías de comunicación.
5. Validación de medidas. Repetibilidad y fiabilidad del sistema. Establecimiento de protocolos de control de calidad.

Capítulo 4

Array inalámbrico para la adquisición de datos sísmicos

La medida de parámetros que evolucionan rápidamente en el tiempo requiere una adecuada temporización del dato adquirido. Así mientras que en una medida de temperatura o gases volcánicos el tiempo de muestreo puede ser de minutos e incluso horas, en medidas de deformación del terreno usando inclinómetros puede ser de pocos minutos o incluso segundos. En el caso sísmico, el muestreo puede variar desde 25 Hz hasta 200 Hz si hablamos de acelerómetros, debido a esto, se debe tener una alta precisión en la toma de la muestra. En el caso concreto de un array sísmico hay que asegurar un alto sincronismo temporal entre los distintos elementos del array.

En el diseño de una antena sísmica se ha de tener en cuenta la frecuencia de las señales que se quieren estudiar. Según el teorema de Shanon, para evitar aliasing, la frecuencia de muestreo debe ser el doble de la frecuencia máxima que se va a estudiar. Teniendo en cuenta el tipo de señales que se pueden encontrar en una región volcánica (VT, LP, tremor, etc.) el rango de frecuencias a estudiar sería de 1 a 15Hz, por lo que el muestreo debería ser de 30 Hz. Debido a que las técnicas de análisis de antenas se basan en buscar la máxima correlación entre señales y estas atraviesan el array con una alta velocidad aparente, en la práctica se suele utilizar frecuencias de muestreo mayores, como mínimo de 100 Hz.

El error de sincronismo aceptable en un array sísmico debería ser inferior al 10% del tiempo entre dos muestras consecutivas, que nos daría 1ms al tratarse de un sistema que funciona a 100 muestras por segundo. Con el objetivo de validar la hipótesis de trabajo se realizará una simulación empleando un array sísmico cableado que el Instituto Geográfico Nacional utiliza para el estudio de la sismicidad del complejo Teide-Pico Viejo en Tenerife. Este

array está compuesto por 9 sensores, dispuesto en una geometría favorable a la detección de eventos procedentes del área de estudio. Se ha simulado, con un software realizado en Python, el error en ángulo y en lentitud que se tendría según la precisión de la sincronización entre los distintos sensores.

Empleando la técnica de formación del haz (beam-forming) se han calculado todos los ángulos de llegada y lentitudes asociadas, introduciendo errores en la diferencia de tiempo de llegada en cada par de estaciones (estación de referencia y otra estación). Se han estudiado los casos de 1 ms, 5 ms y 10 ms.

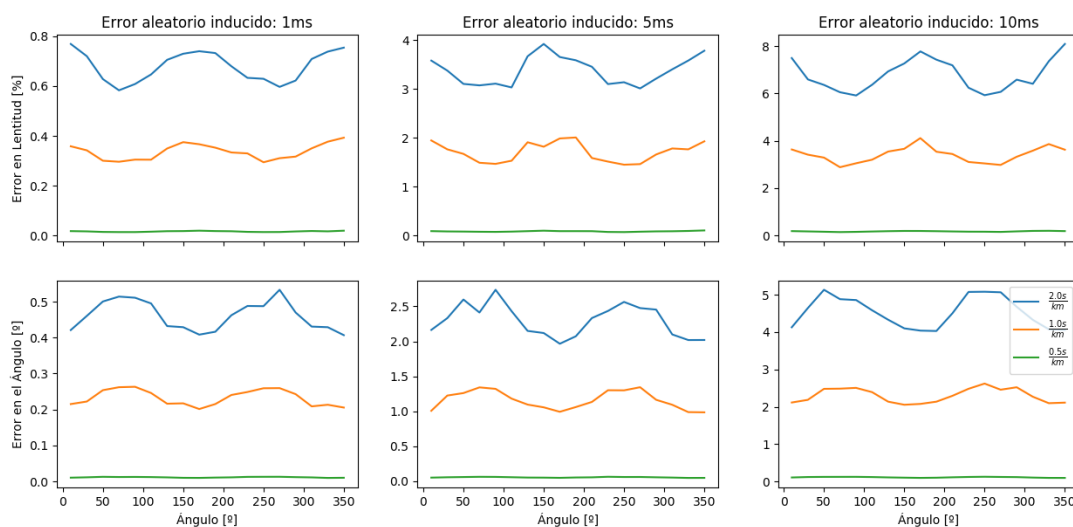


Figura 4.1. Error cometido en el cálculo de los ángulos de llegada y lentitudes al introducir errores aleatorios de 1, 5 y 10 ms máximos.

Se puede observar en la Figura 4.1 que al introducir errores aleatorios como máximo de 1 ms, en la diferencia de llegada entre par de estaciones; se tiene en el peor de los casos, errores del 0.8% para lentitudes de 2 s/km y 0.6 grados en el cálculo del azimut. Esto supone un orden de magnitud inferior con respecto al error introducido en el caso de tener 10 ms de precisión en la toma sincronizada del dato. Un error de 1 ms en la toma de la muestra supone obtener una solución con un error inferior a 1 grado.

Un sincronismo tan alto se lograría introduciendo la señal de tiempo proporcionada por un reloj GPS disciplinado en la entrada de reloj de un conversor A/D. De tal forma que al estar la señal de reloj sincronizada con el tiempo GPS, cualquier conversor adquiriría el dato en el mismo instante de tiempo. Esta propuesta ha sido validada con el desarrollo realizado.

4.1 Diseño de una estación de adquisición de datos del array sísmico

El hardware de partida es el descrito en el apartado 3.2. El reloj del conversor utilizado trabaja a 2.456MHz, dicha señal es proporcionada por un receptor de bajo coste especializado en sincronización GPS U-blox NEO-M8T (Anexo A Tabla A.7). La frecuencia generada con el receptor GPS introduce un ruido electrónico en el conversor debido principalmente a la alta frecuencia que invade la parte analógica como se verá en el apartado 5.5. Esto lleva a replantear el diseño para minimizar el ruido electrónico, así que por un lado se trata de reducir la frecuencia de trabajo y por otro, eliminarla de la parte analógica.

La propuesta inicial es que el receptor GPS genere una frecuencia de 100 Hz, exactamente la frecuencia de muestreo, rebajando en dos órdenes de magnitud la frecuencia original de funcionamiento, además esta señal será introducida en el microcontrolador y no directamente en la parte analógica. La señal de 100 Hz no puede ser usada directamente como trigger para las conversiones del A/D, debido a que se trata de un conversor delta-sigma que necesita una alta frecuencia de trabajo (2.456MHz). El conversor dispone de una entrada de sincronismo (SYN) cuya función es habilitar el conversor en un momento determinado. De esta forma, si se tienen varios conversores compartiendo el mismo reloj pueden comenzar las medidas en el mismo instante quedando sincronizados, incluso si hay derivas en el reloj, puesto que todos la comparten.

Los tiempos en los que son realizadas las conversiones están determinados directamente por el reloj del propio conversor, y sólo la primera muestra está determinada por el momento en el que se activa la línea SYN indicando que comience la conversión. La primera conversión tendrá lugar transcurrido un tiempo de estabilización, que es mucho mayor que el tiempo entre conversiones sucesivas posteriores. Si se logra determinar este tiempo de estabilización exactamente y se conoce el instante en que se activó la señal de sincronismo (SYN) se podría dar el tiempo en el que se adquirió esa primera muestra.

El tiempo de estabilización depende directamente de la frecuencia de muestreo, siendo mucho menor cuando la frecuencia aumenta. De esta forma, para reducir el tiempo de estabilización habría que aumentar la frecuencia de muestreo. Este aumento de frecuencia conlleva una reducción en la resolución del conversor utilizado hasta el momento (AD7714), por ese motivo se cambia al conversor (AD7193) también de Analog Devices (Figura 4.2) que es un conversor de 8 canales, 24 bits y alta frecuencia de muestreo. Al igual que en el anterior, la comunicación se realiza mediante un protocolo serie (SPI) y dispone también de una línea de sincronismo (SYN) y una línea que informa de que existe una conversión disponible (DRDY).

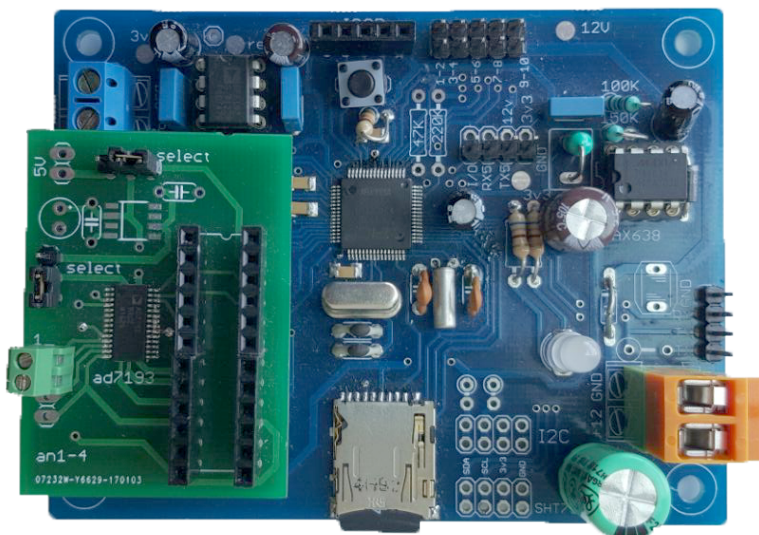


Figura 4.2. Sistema de adquisición con el nuevo convertor A/D AD7193. Se ha aprovechado el mismo hardware del AD7714 y se ha adaptado al nuevo convertor.

Cuando la señal SYN está a nivel bajo, el convertor se desactiva pero no pierde la configuración que previamente se le haya programado. El hecho de que se desactive implica que la señal DRDY que informa de que existe una nueva conversión para ser leída, se encuentre a nivel alto (ya que un nivel bajo indica una conversión disponible). Una señal de 100 Hz, procedente de un GPS que posee un oscilador disciplinado, es introducida como señal de muestreo en el microcontrolador. En cada flanco de subida de esta señal, la línea SYN es puesta a 1, habilitando el convertor. Dependiendo de la configuración de éste, tras un tiempo de estabilización inicial, comenzará a adquirir a la frecuencia de muestreo programada, aunque únicamente se tomará la primera muestra, tras hacerlo se desactivará (señal SYN a nivel bajo).

La primera conversión tendrá lugar tras un tiempo de estabilización superior al tiempo de muestreo programado, este tiempo depende del orden del filtro digital utilizado en el convertor. Los convertidores delta-sigma suelen utilizar un filtro sinc, fundamental para completar el proceso de conversión, ya que se necesita eliminar el ruido de alta frecuencia que genera el proceso. El convertor dispone de dos filtros, un SINC de orden tres (sinc3) y otro de orden cuatro (sinc4). Como se ha dicho, el tiempo de estabilización depende del orden del filtro usado de tal forma que $t_{set} = \frac{3}{f_{adc}}$ en caso de usar el filtro sinc3 o bien $t_{set} = \frac{4}{f_{adc}}$ en el caso de usar un filtro sinc4. El fabricante recomienda utilizar el filtro sinc4 para frecuencias altas, pero la elección del filtro se hará a posteriori. Debido a que sólo interesa tomar la primera muestra que adquiera el convertor, es importante tener en cuenta este tiempo de estabilización ya que la frecuencia de muestreo que se requiere es de 100 Hz. De esta forma,

hay que calcular la frecuencia de muestreo real a la que debe funcionar el conversor para que haya tiempo de hacer una medida cada 10 ms (100 Hz). Así, si se utilizara un filtro sinc4:

$$t_{set} = \frac{4}{f_{adc}} < 10 \text{ ms} \rightarrow f_{adc} > 400 \text{ Hz} \quad [5]$$

como el tiempo de estabilización debe ser menor de 10 ms, implica que la frecuencia de muestreo del conversor debe ser mayor que 400 Hz.

Si el filtro utilizado es sinc3:

$$t_{set} = \frac{3}{f_{adc}} < 10 \text{ ms} \rightarrow f_{adc} > 300 \text{ Hz} \quad [6]$$

la frecuencia de muestreo debería ser mayor de 300 Hz.

En la Figura 4.3 se representa la lógica de funcionamiento del sistema de tiempo, se ha utilizado un filtro sinc3 y una frecuencia de muestreo de 350 Hz. Una señal de 100 Hz procedente del GPS (B), es introducida en el microcontrolador, en cada flanco de subida este activará el conversor (C). Pasado un tiempo de estabilización el conversor indicará que existe una muestra disponible (A), tras esto el microcontrolador devolverá la señal SYN a estado inactivo.

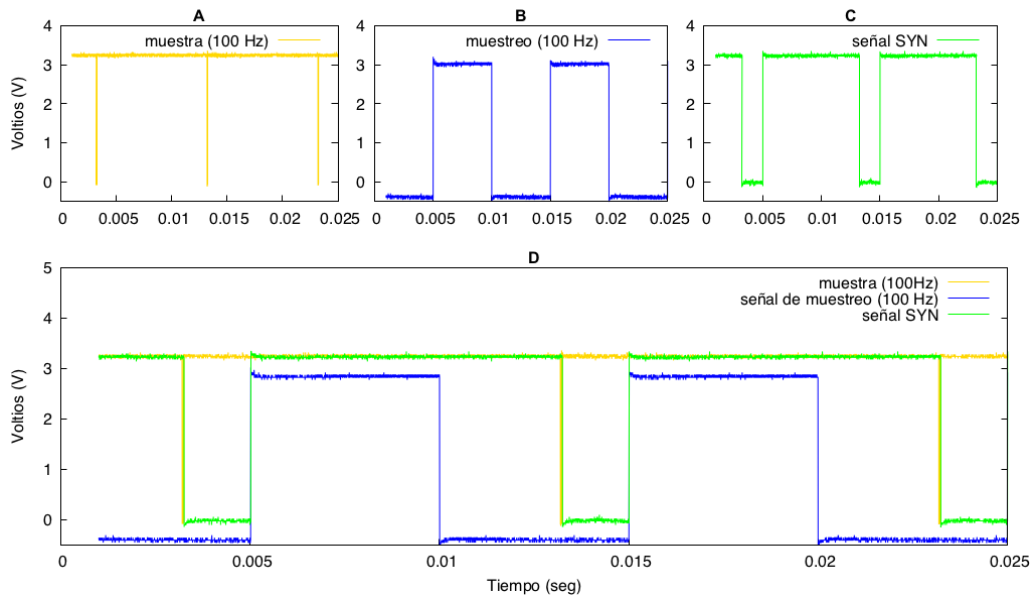


Figura 4.3. Relación entre las distintas señales que disparan la adquisición. **A)** Señal de 100 Hz que indica al microcontrolador que existe una muestra disponible. **B)** Señal de 100Hz procedente del GPS que indica el momento en que debe ser activado el conversor A/D. **C)** Señal de sincronismo que activa el microcontrolador al recibir el flanco de subida de la señal representada en B y que desactiva al recibir la señal de muestra disponible representada en A. **D)** Presentación de todas las señales conjuntamente.

4.2 Funcionamiento de una estación de adquisición de datos del array sísmico

El receptor satélite GPS utilizado dispone de dos salidas de pulso, cuya frecuencia y ciclo de trabajo puede ser programado, también dispone de un puerto serie por el que emite datos de navegación en formato NMEA 0183 (National Marine Electronics Association). Una de ellas, la señal de muestreo, se programa a 100 Hz, con un ciclo de trabajo del 50%. La otra, señal de Pulso Por Segundo o PPS, se programa a 1Hz con un ciclo de trabajo del 10%. Esta segunda señal realiza dos funciones: delimitar los paquetes de datos, pudiéndose generar paquetes de distintos tamaños según la duración programada de estos en segundos; y marcar el tiempo en los datos junto a la trama NMEA que emite el receptor satélite. Los paquetes, una vez generados, son guardados en la tarjeta de memoria y transmitidos. En la Figura 4.4 se muestra el diagrama de funcionamiento del sistema.

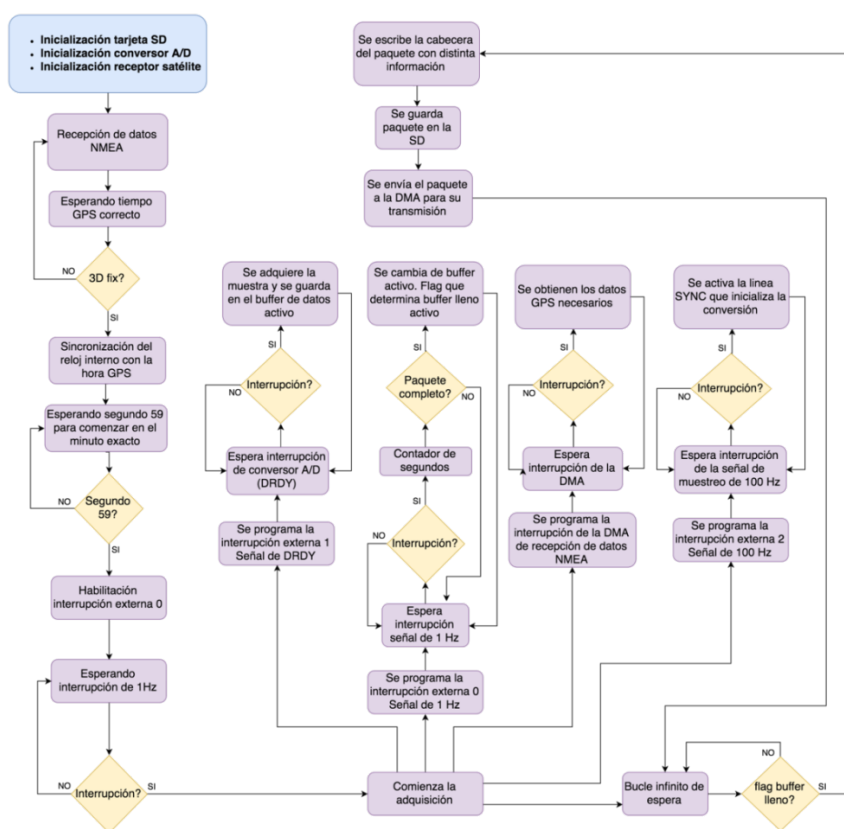


Figura 4.4. Diagrama de funcionamiento general del sistema de adquisición para sísmica.

El microcontrolador inicializa los distintos puertos que va a usar, así como los distintos periféricos, como la UART, SPI, DMA. Para proceder luego a la inicialización de la tarjeta de

memoria, conversor A/D y receptor satélite. Tras la inicialización, se comenzará a recibir las distintas tramas NMEA previamente configuradas y que son los mensajes GGA y ZDA. El primero de ellos da información acerca de la ubicación y precisión 3D del receptor satélite. El segundo (ZDA) proporciona hora y fecha para los datos (Tablas 4.1 y 4.2). De esta forma, el comando GGA se usará para determinar si el tiempo es correcto y por tanto los pulsos generados son buenos y el comando ZDA sincronizará la hora del sistema.

\$GPZDA,hhmmss.ss,dd,mm,yyy,xx,yy*CC	
hhmmss	HrMinSeg (UTC)
dd,mm,yyyy	Día,Mes,Año
xx	Horas locales de la zona de -13 a 13
yy	Minutos locales de la zona de 0 a 59
*CC	Checksum

Tabla 4.1. Descripción de los campos del mensaje ZDA

\$GPGGA,hhmmss.ss,lll.ll,a,yyyyy.yy,a,x,xx,x.x,x.x,M,x.x,M,x.x,xxxx*CC	
hhmmss.ss	Hora UTC de la posición
lll.ll	Latitud de la posición
a	N (Norte) o S (Sur)
yyyyy.yy	Longitud de la posición
a	E (Este) o W (Oeste)
Calidad GPS:	
x	0 – no fix
	1 – GPS fix
	2 – GPS diferencial fix
xx	Número de satélites en uso
x.x	Dilución de la posición horizontal
x.x	Altitud de la antena por encima del nivel del mar
M	Unidades de la altitud de la antena, metros
x.x	Separación geoidal
M	Unidades de la separación geoidal, metros
x.x	Edad de los datos GPS diferenciales (segundos)
xxxx	ID de estación de referencia diferencial
*CC	Checksum

Tabla 4.2. Descripción de los campos del mensaje GGA

El sistema automáticamente comenzará a adquirir datos en el minuto más próximo a la hora de sincronización del sistema. La adquisición comenzará al recibir el PPS correspondiente a ese minuto. En ese instante se habilitan distintas interrupciones: interrupción de adquisición para los 100Hz; interrupción de PPS para determinar el tamaño de los paquetes y sincronización; interrupción de DMA para recibir las tramas NMEA sin

necesidad de atender el puerto serie. Paralelamente a estas interrupciones se estará ejecutando, en bucle infinito, el programa principal, que es un bucle que atiende a un *flag*, cuya función es indicar que se ha alcanzado el tamaño programado de un paquete y que puede ser escrito en memoria y transmitido.

4.2.1 Control del tamaño del buffer de datos

La función de esta interrupción es controlar el tamaño del buffer de datos, cambiar de buffer si se llena, indicar al resto del sistema que el mensaje NMEA guardado en memoria ya no es válido y establecer una medida de tiempo (Figura 4.5).

La lectura del contador de ciclos de instrucción del microcontrolador se realiza para temporizar el tiempo transcurrido desde la recepción del PPS hasta la primera muestra, un ciclo instrucción equivale a $0.1 \mu s$. En esta interrupción se toma el tiempo de comienzo (C1) y en la interrupción de adquisición, el tiempo de finalización (C2). El sistema cuenta además con dos buffers que se irán intercambiando según se vayan llenando. El tamaño del buffer viene definido por el tiempo programado, en segundos. Es aquí, por tanto, donde se cambia de un buffer a otro una vez alcanzado el límite del paquete. Este cambio se realiza mediante un *flag* que indica qué buffer se está usando en cada momento.



Figura 4.5. Diagrama de funcionamiento de la interrupción de PPS

La trama NMEA emitida por el receptor GPS tiene una cadencia de 1 segundo y se transmite unos cientos de milisegundos después del PPS. Debido a esto, en esta interrupción

también se utilizan dos *flags*, correspondientes a los mensajes ZDA y GGA, que se escriben a 0, indicando que los mensajes correspondientes, almacenados en memoria por la DMA, no son válidos, puesto que pertenecen al segundo anterior.

4.2.2 Activación de la señal de sincronización

En este vector de interrupción únicamente se activa el conversor, es decir, se activa la señal SYN, haciendo que el conversor inicie el proceso de adquisición de la muestra. Que tendrá una determinada duración, según la frecuencia de adquisición programada y el filtro seleccionado.

4.2.3 Adquisición del dato

La función de esta interrupción es adquirir la muestra, temporizarla y guardarla en memoria RAM (Figura 4.6).

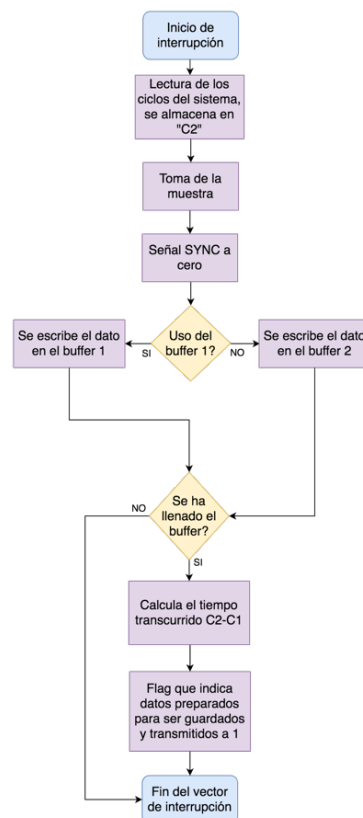


Figura 4.6. Diagrama de funcionamiento del vector de interrupción por recepción de señal DRDY que indica que acaba de finalizar una conversión y esta está disponible.

El sistema guarda los datos en RAM, concretamente en dos buffers cuya longitud máxima es de 4096 bytes. Mientras se escribe en uno de los buffers, el otro puede ser leído. En este punto, el sistema verificará qué buffer está en uso antes de escribir el dato. Al inicio de esta interrupción se lee la cuenta de los ciclos de instrucción transcurridos desde que se activó el microcontrolador; esta cuenta se guarda en una variable C2. Sólo en el momento en el que se cambia de buffer de datos, el sistema calcula el tiempo $C2-C1$, dando un valor, en décimas de microsegundo, correspondiente al tiempo transcurrido entre la recepción del PPS y la recepción de la señal DRDY del conversor, quedando por tanto bien definida temporalmente la muestra adquirida.

4.2.4 Interrupción de DMA

En este vector de interrupción se identifican y ordenan los comandos NMEA que se reciben, además se verifica, mediante suma de chequeo, que no hay errores en la recepción y se copian a otra región de memoria (Figura 4.7).

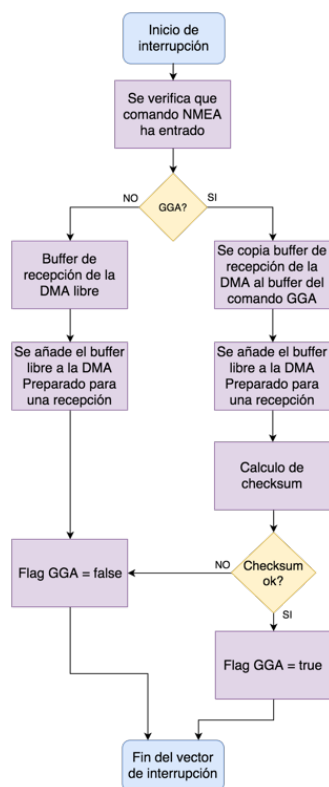


Figura 4.7. Diagrama de funcionamiento del vector de interrupción de la DMA.

En la Figura 4.7 se representa el tratamiento de un mensaje NMEA, concretamente el mensaje GGA. En este vector de interrupción, el mensaje es copiado a una región de memoria

una vez verificado que se trata del mensaje correcto y de si la cadena de texto es íntegra. Para clarificar, en el diagrama sólo se presenta el proceso que se hace para uno de los mensajes NMEA, en realidad en este vector de interrupción se realiza exactamente el mismo proceso para los mensajes GGA y ZDA. Antes de salir de la rutina de interrupción, se activa o desactiva el *flag* correspondiente al mensaje procesado, indicando si se ha recibido correctamente o no.

4.2.5 Programa principal

El bucle principal realiza el guardado y transmisión del paquete que acaba de ser finalizado, escribe una cabecera en los datos y además hace algunas comprobaciones sobre calidad de estos (Figura 4.8).

Aquí se comprueban múltiples *flags*, que se activan en los distintos vectores de interrupción. El principal es el que indica que se ha llenado uno de los dos buffers de datos y por tanto hay que guardarlo y transmitirlo. Para realizar esta acción dispone de todo el tiempo que se tarda en llenar el siguiente buffer o paquete de datos.

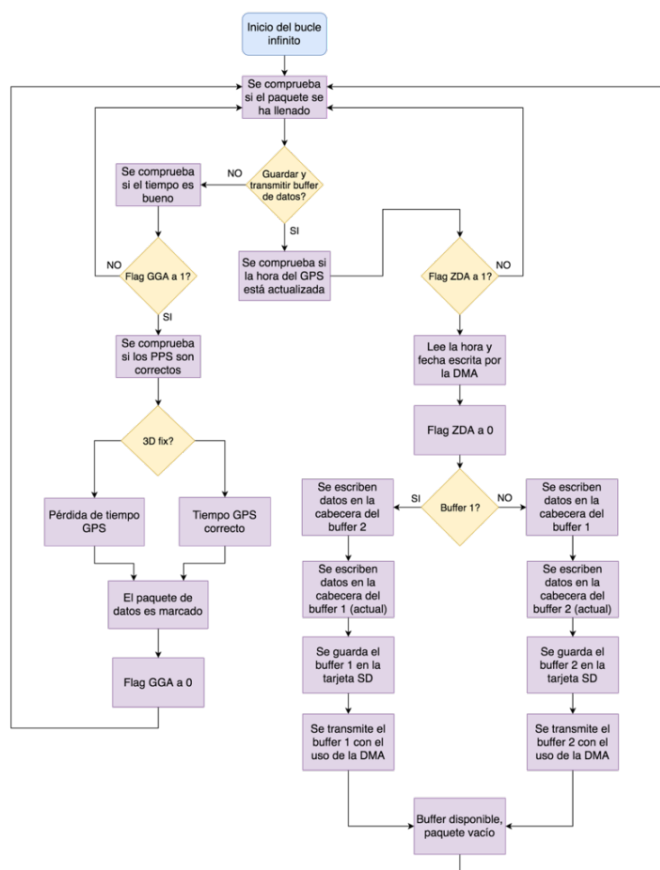


Figura 4.8. Diagrama de funcionamiento del programa principal que se ejecuta en un bucle infinito.

También se comprueba, cada segundo, si el tiempo recibido por NMEA es bueno y por tanto si las frecuencias generadas para realizar la adquisición están alineadas con el tiempo GPS. Como se vio en la interrupción de la DMA por recepción de la trama de NMEA, si el mensaje recibido es correcto, se activa un *flag* y si es incorrecto se desactiva, tanto para el mensaje GGA como para el ZDA. En el bucle principal, una vez leído el mensaje GGA, el *flag* correspondiente es desactivado, hasta que vuelva a ser activado en la interrupción de la DMA. Esto se hace así para evitar leer dos o más veces la misma información, ya que ésta es sólo válida para el segundo en curso. Lo mismo ocurre para el mensaje ZDA, una vez leída la fecha y hora, se desactivará el correspondiente *flag* para evitar leer la misma información varias veces. Será en el vector de interrupción de la DMA, una vez comprobado que el mensaje NMEA es íntegro, la que active el *flag* correspondiente.

Cuando hay un paquete disponible para ser guardado y transmitido se lee la fecha y hora del segundo actual de la dirección de memoria donde está alojada esta información, pero antes de hacer esta lectura se espera a que el *flag* del mensaje ZDA esté activo, indicando que la fecha y hora transmitida pertenece al segundo actual y no al anterior. Esta fecha y hora es escrita en el paquete que está siendo usado actualmente, no en el que se va a guardar y transmitir, ya que la primera muestra guardada en el buffer que está en uso se corresponde al inicio del segundo actual, que no es transmitido a través del mensaje ZDA hasta decenas o centenas de milisegundos posteriores al PPS correspondiente. De esta forma queda marcada la primera muestra de cada paquete.

Tras escribir la hora en la cabecera del paquete en uso, se escribirán otra serie de datos informativos tanto en la cabecera del paquete que se va a guardar y transmitir como en la cabecera del paquete en uso. Tras esto, el paquete será guardado en una memoria SD y luego será transmitido vía DMA. La transmisión del paquete de datos se realiza mediante DMA para evitar esperas, ya que dependiendo del tamaño del paquete esta transmisión puede demorarse algunos segundos.

Los paquetes son transmitidos localmente (centenares de metros) a un sistema con Linux embebido donde serán procesados y accedidos vía web.

4.3 Formato de los datos

Debido a la baja tasa de datos que genera un sistema que monitoriza parámetros lentos, como la medida de gases volcánicos y temperatura vistos en apartados anteriores, se ha

utilizado el formato CSV (Comma Separated Values) para almacenar los datos. Al tratarse de ficheros horarios o diarios compuestos por cadenas de texto separadas por comas es muy fácil su manejo, además cada fichero contiene una cabecera, dependiendo del parámetro que se mida, de tal forma que se puede automatizar su representación.

El caso de sismología es distinto. Se han usado muchos formatos que contienen no sólo información del dato tomado, sino de la instrumentación utilizada, la respuesta del instrumento, el nombre de la estación, su posición, etc. La mayoría de estos formatos se pueden agrupar en cinco clases [NMSOP-2, 2012]:

- 1) Formatos locales usados en dataloggers locales (ESSTF, PDR-2, BDSN, GDSN).
- 2) Formatos usados en software de análisis (SEISAN, SAC, BDSN).
- 3) Formatos para transmitir y archivar los datos (SEED, GSE).
- 4) Formatos diseñados para bases de datos (CSS, SUDS).
- 5) Formatos para la transmisión en tiempo real de los datos (IDC/IMS, Earthworm, CD1).

Actualmente el Instituto Geográfico Nacional utiliza el formato CD1 versión 2 para la visualización de las señales sísmicas en tiempo real.

En el caso de un array sísmico, debido a que realmente son estaciones sísmicas, se sigue utilizando cualquiera de los formatos anteriores, o bien algún tipo de formato intermedio que luego es convertido.

En el caso particular de un array inalámbrico, es preferible utilizar un formato de datos reducido, que aporte la información mínima necesaria, para que las transmisiones sean lo más cortas posibles maximizando la información transmitida.

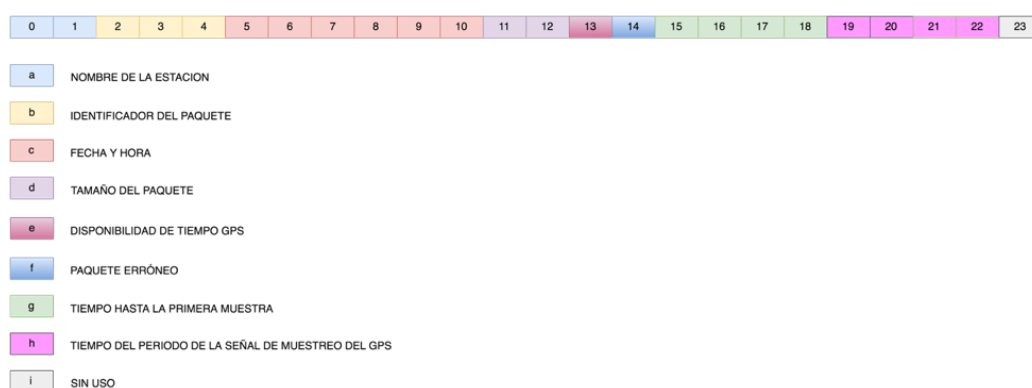


Figura 4.9. Cabecera utilizada en las estaciones que conforman el array sísmico inalámbrico.

En el sistema desarrollado se ha optado por transmitir paquetes de datos definidos por tiempo. Cada paquete de datos contiene una cabecera que describe el paquete generado (Figura 4.9). Los datos sísmicos se escriben a continuación de la cabecera y finalizan con tres bytes a 0xFF. La descripción de los 24 bytes de la cabecera es la siguiente:

- a) Nombre de la estación (2 bytes). Es el nombre que cada estación recibe, normalmente es una S de "station" y un número identificativo escrito en binario.
- b) Identificador de paquete (3 bytes), pudiendo por tanto numerar 2^{24} paquetes. Su función es la de establecer un orden en los paquetes y hacer distintas comprobaciones a posteriori.
- c) Fecha y hora (6 byte). Está escrito en BCD empaquetado y ofrece información del año, mes, día, hora, minuto y segundo, por ese orden. Da la hora exacta, con resolución de segundos, de la primera muestra de ese paquete.
- d) Tamaño del paquete (2 bytes). Indica el número de bytes que ocupa todo el paquete de datos incluyendo la cabecera.
- e) Disponibilidad de tiempo GPS (1 bytes), sólo toma el valor 0 y 1. Indica si en algún momento durante la adquisición del paquete ha dejado de existir hora GPS.
- f) Paquete erróneo (1 bytes) aunque, al igual que el anterior, únicamente toma valores de 0 y 1. Indica si el tamaño del paquete no es el previsto, lo que invalidaría totalmente los datos contenidos en él.
- g) Tiempo hasta la primera muestra (4 bytes). Es el tiempo que transcurre desde el PPS hasta que se adquiere la primera muestra del paquete. La resolución de este tiempo es de 100 ns y sumándose al tiempo en "c" determina la primera muestra del paquete con una resolución de 0.1 μ s.
- h) Tiempo del periodo de la señal de muestreo. Es la duración del periodo de la señal de 100 Hz del receptor GPS, medido con el reloj del microcontrolador.

Los datos están definidos como valores enteros de 24 bits, de tal forma que un paquete de datos tendrá un tamaño que depende directamente del tiempo, en segundos, que se defina.

$$paq_{size} = t_{paq} * f_{mues} * res + h_{size} + e_{bloque} \quad [7]$$

donde paq_{size} es el tamaño final del paquete que será transmitido y guardado, t_{paq} es el tiempo de duración definido, f_{mues} es la frecuencia de muestreo, res es la resolución utilizada, h_{size} es

el tamaño de la cabecera, y finalmente e_{bloque} es el número de bytes de finalización del paquete.

Para el caso particular en el que se programe un paquete de 5 segundos de duración, el tamaño del paquete que se transmitirá será de 1527 bytes. Este valor estará escrito en la propia cabecera.

4.4 Valoración del sistema de medida desarrollado

En este capítulo se ha descrito el desarrollo de un sistema de adquisición para sismología que parte de los desarrollos descritos en el capítulo 3, y cuyos resultados se presentarán en el capítulo 5. Para cumplir el objetivo de que el equipo funcione como elemento de un array sísmico, se han seguido las siguientes pautas:

1. Evaluación de las prestaciones de los equipos diseñados y/o comerciales utilizados y su caracterización experimental en el laboratorio.
2. Implementación de un método de procesado de datos empleando un ordenador de altas prestaciones y a partir de datos reales. La implementación se ha realizado considerando minimizar las líneas de código y el tiempo de ejecución. El gran problema de realizar el procesado in-situ es la necesidad de un excesivo tiempo de cálculo con el consiguiente consumo energético, que aumenta en gran medida con cada elemento nuevo que se añada a la red.
3. Implementación de este algoritmo en un procesador de limitada capacidad de procesado y bajo consumo. La existencia en el mercado de microordenadores de bajo costo y bajo consumo basados en Linux, ha hecho posible la construcción de la plataforma de trabajo para realizar el procesado de la señal sísmica [Raspberry Pi 2013] [BeagleBone 2013].
4. Validación de medidas. Repetibilidad y fiabilidad del sistema. Establecimiento de protocolos de control de calidad.

4.5 Evolución del diseño del sistema de adquisición

A modo de síntesis, en la Tabla 4.3 se presenta una recopilación de las distintas versiones de sistemas de adquisición que se han desarrollado en el trabajo de Tesis. Desde un

sistema para la medida de parámetros lentos (gases volcánicos, temperatura, presión, humedad, etc.) y sin comunicación inalámbrica, hasta la última versión con alto muestreo, donde los paquetes llegan a un sistema central que incorpora Linux embebido y donde se procesan, y permite acceder a ellos vía web.

Versión	Componentes principales	Característica
0	PIC18F2620 + AD7706	Bajo muestreo, sin comunicaciones
1	Raspberry + AD7706	Bajo muestreo, con comunicaciones
2	PIC32MX450F256H + AD7714 + Raspberry	Alto muestreo con comunicaciones
3	PIC32MX450F246H + AD7193	Muy alto muestreo

Tabla 4.3. *Resumen de la evolución de los distintos desarrollos*

Capítulo 5

Caracterización y validación de los sistemas de adquisición para monitorización volcánica

La interoperabilidad de datos empleando software de código abierto es prioritaria frente a la tecnología por dos razones principales: puede ser implementada con costes razonables, ahora o de forma progresiva, aunque la actualización tecnológica no es muy rápida, la fluidez y calidad del intercambio de datos es más urgente.

En este capítulo a partir del estado del arte de los sistemas estudiados en el capítulo 2, se presenta la validación del sistema multiparamétrico para monitorización volcánica descrito en el capítulo 3, que permite la explotación de los datos adquiridos por la red de sensores empleando la red Internet.

Así mismo, tomando como base el sistema de adquisición del sistema multiparamétrico para monitorización volcánica, se ha diseñado una estación sísmica inalámbrica como elemento base para la creación de un array sísmico, que ha sido validada en el laboratorio y en pruebas de campo. Y cuyos resultados se presentan en este capítulo.

Se ha contemplado tanto el diseño hardware como la implementación de la base de datos, de los servidores de datos, y el desarrollo del entorno gráfico para la visualización, consulta y descarga de los conjuntos de datos.

5.1 *Sistema adquisición empleando Linux embebido*

Como se ha explicado en apartados anteriores, por los buenos resultados en cuanto a relación señal/ruido y consumo conseguidos, el sistema desarrollado parte de un desarrollo anterior (versión 0) [Moure, D. et al. 2013], en el que se sustituye el microcontrolador por un ordenador de pequeñas dimensiones con Linux embebido. El sistema se instaló en diferentes ubicaciones (apartado 3.1), utilizando diversos sensores (Figura 5.1). Tres de los sistemas están instalados en la isla de Tenerife y uno en la isla de El Hierro. Cada aplicación de medida (gravedad, deformación, mareas, imágenes) está caracterizada por su electrónica específica de acondicionamiento de señal.

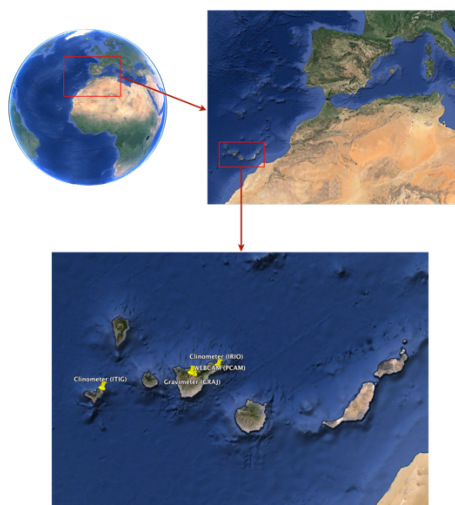


Figura 5.1. *Localización de los distintos sistemas de monitorización volcánica.*

GRAVEDAD

El sistema de medida de gravedad fue instalado el 6 de agosto de 2014 en Las Cañadas del Teide, muy próximo al complejo volcánico Teide-Pico Viejo ($28^{\circ} 15' 35.5''\text{N}$; $16^{\circ} 35' 48.8''\text{W}$) (Figura 5.2). La instalación cuenta con un fuerte aislamiento térmico para evitar errores en la medida de la gravedad. Para comprobar el correcto funcionamiento del sistema fue comparado y calibrado con la curva teórica de la gravedad, obtenida a partir de la marea terrestre teórica y de la carga oceánica para el punto en el que está instalado el instrumento (Figura 5.3).



Figura 5.2. Sistema de adquisición con Linux embebido. El sensor utilizado es un gravímetro junto con varios sensores meteorológicos. En la imagen se observa el microordenador a la izquierda y la placa de adquisición del gravímetro y de la estación meteorológica a la derecha.

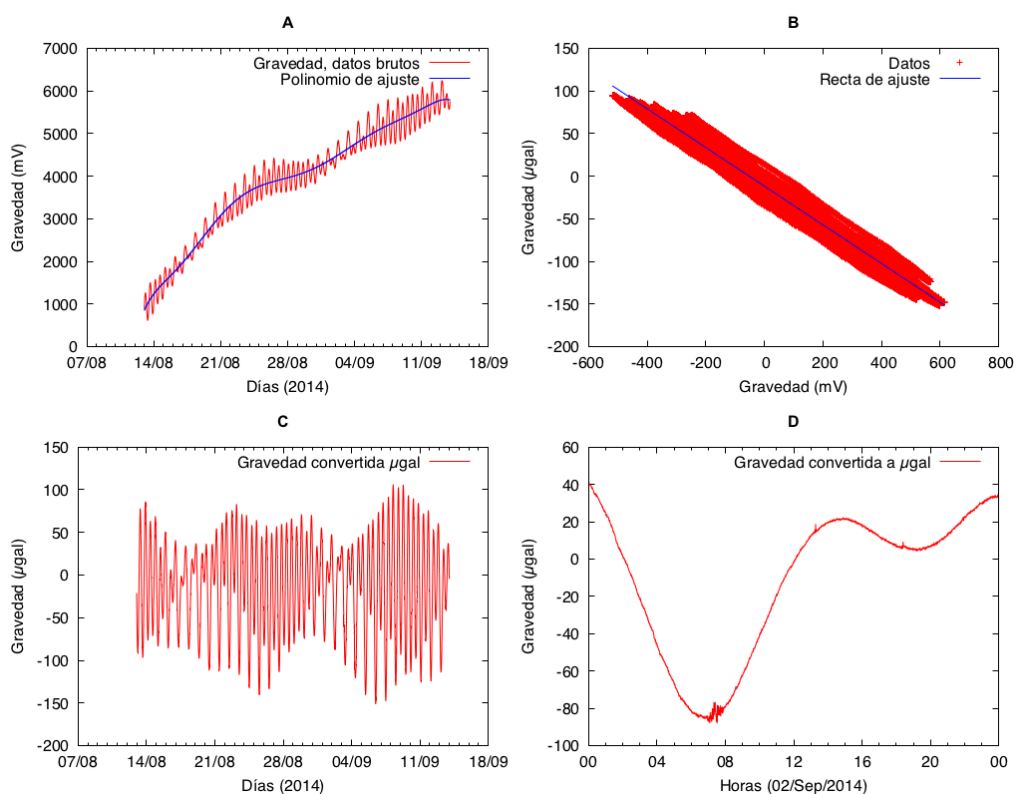


Figura 5.3. Gráficas de los datos registrados por el sistema de adquisición con Linux embebido. **A)** Representación de la evolución temporal de la gravedad registrada (mV) y la curva de tendencia. **B)** Representación del ajuste lineal de la gravedad teórica (μgal) frente a la experimental (mV). **C)** Representación de la evolución temporal de gravedad medida (μgal). **D)** Detalle de la gráfica anterior en la que se puede observar en el mareograma, el registro de un terremoto lejano.

El sistema diseñado presenta una deriva a lo largo del tiempo debida a efectos de temperatura, humedad y presión, así como a la propia del equipo de medida, que se ajusta a un polinomio de octavo grado (Figura 5.3 (A)). La corrección de esta deriva se realiza restando el polinomio a los datos registrados. El factor de conversión, dado por el fabricante del sensor, permite la conversión de los datos de mV a μGal . Conociendo la curva teórica de la gravedad se puede obtener el factor de conversión, para ello se ha realizado el ajuste a una recta ($mx + b$) por mínimos cuadrados de la señal teórica (μGal) frente a la real (mV), obteniéndose un valor de $(-0.227m - 11.831)$, con un error cuadrático medio de 0.97 (Figura 5.3 (B)). Se ha representado la gravedad en unidades de μgal sin la deriva instrumental (Figura 5.3 (C)). Dado que la señal muestreada es de bajo ruido, menor que 1mV, sumado a la gran sensibilidad del equipo, permite registrar señales asociadas a terremotos lejanos (Figura 5.3 (D)).

DEFORMACIÓN

El sistema de medida de deformación (Figura 5.4) se encuentra instalado en galerías construidas para la extracción del agua en las islas de Tenerife ($28^{\circ} 14' 50.3'' \text{ N}$; $16^{\circ} 43' 16.4'' \text{ W}$) desde el 17 de junio de 2014 y en El Hierro ($27^{\circ} 47' 18.2'' \text{ N}$; $17^{\circ} 55' 19.9'' \text{ W}$) desde el 11 de junio de 2014 (Figura 5.1). Su ubicación en galerías se debe a que la respuesta de estos sensores está muy influenciada por la temperatura, por lo que se intenta buscar emplazamientos que garanticen una elevada estabilidad térmica. Además, el sistema instalado se encuentra térmicamente aislado para minimizar en lo posible cambios bruscos de la temperatura.

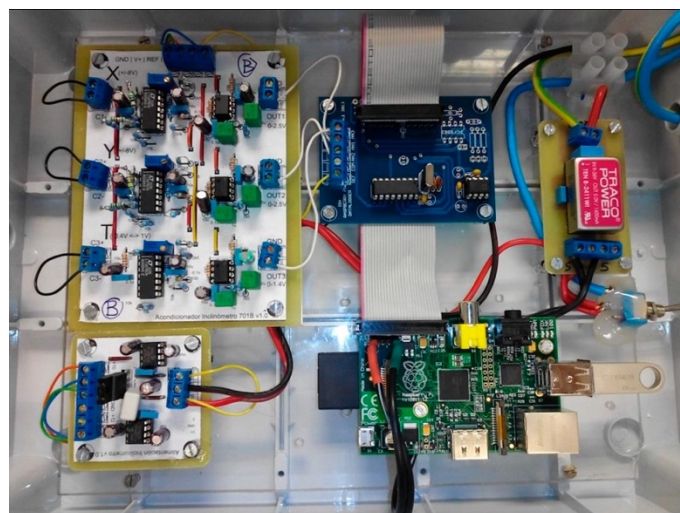


Figura 5.4. Sistema de adquisición con Linux embebido. El sensor utilizado es un inclinómetro de plataforma de dos ejes y un sensor de temperatura. Las PCB de la izquierda (de color amarillo) se corresponden con la electrónica de acondicionamiento de cada canal (X, Y y T) y la alimentación.

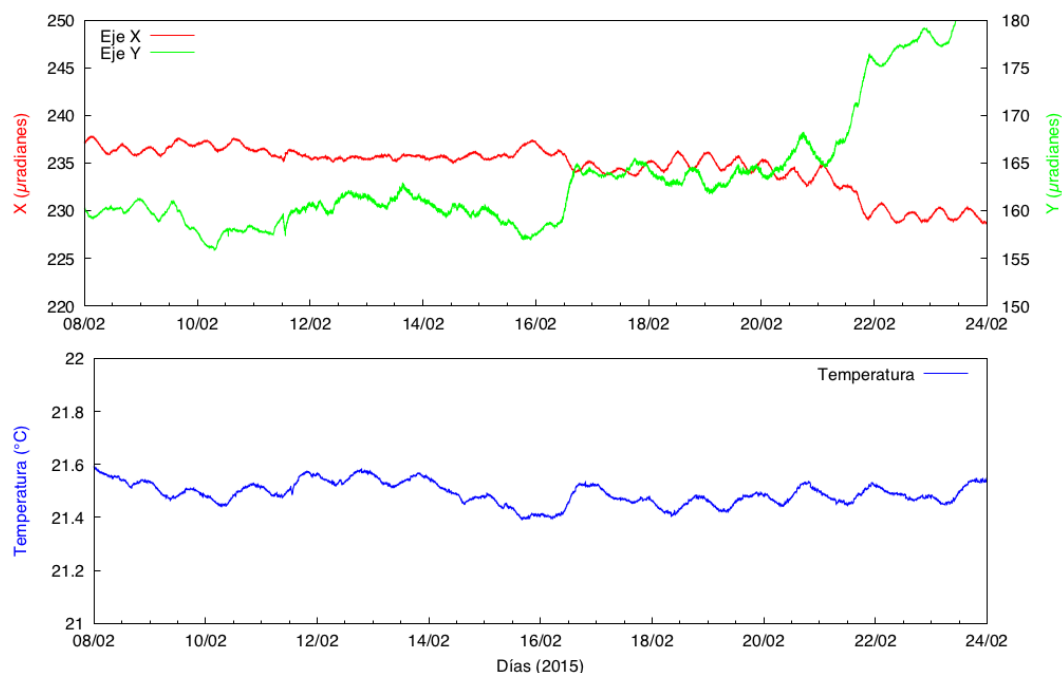


Figura 5.5. Representación de 15 días de registro en El Hierro de la estación ITIG (galería Tigrote). En la gráfica superior se observa la deformación del terreno en dos ejes perpendiculares, en μrad . La gráfica inferior muestra la evolución temporal de la temperatura en grados Celsius.

El sistema posee una gran estabilidad térmica, su variación es inferior a 0.2°C , lo cual es importante debido a que la respuesta de estos sensores está muy correlacionada con la temperatura. Debido a la alta sensibilidad del sistema ($0.1 \mu\text{rad}$), puede apreciarse el registro de la marea terrestre en la parte superior de la Figura 5.5 como una ondulación de la señal.

Se ha hecho una comparativa del sistema desarrollado en el trabajo de Tesis con un sistema de adquisición comercial (Figura 5.6), el *CR800* de la firma *Campbell Scientific* [CR800 2015]. Debido a que este datalogger es de 12 bits, para conseguir una resolución lo más similar posible al sistema desarrollado, se ha ajustado su rango de entrada a $\pm 2500 \text{ mV}$. El sensor, cuya salida en modo diferencial es de $\pm 16 \text{ V}$, ha tenido que ser nivelado de forma muy precisa en torno a su cero, para que su evolución durante los días que ha durado la prueba no superase el margen de entrada del sistema comercial.

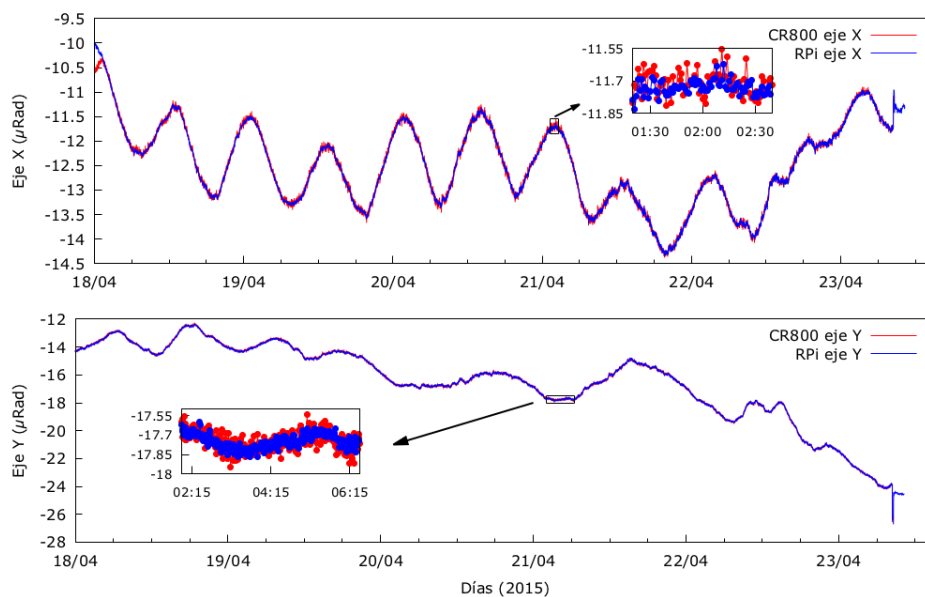


Figura 5.6. Comparativa del registro de un sensor de deformación con el sistema desarrollado y un sistema de adquisición comercial. La gráfica superior muestra la evolución del eje X con ambos sistemas y un detalle del ruido de ambos. La gráfica inferior muestra el registro del eje Y.

En la Figura 5.6 puede observarse que la evolución de ambos sistemas es igual pero el ruido del sistema desarrollado es una magnitud inferior al que presenta el sistema comercial (Tabla 5.1). Esto es debido, en parte, a que el sistema comercial es de 12 bits midiendo un rango de $\pm 2.5V$ y el sistema desarrollado es de 16 bits midiendo un rango de $\pm 8V$ (de forma unipolar), pero es de utilidad como referencia para comprobar de la calidad del sistema desarrollado.

	CR800 (ruido)	RPi (ruido)
Eje X	0.15 μRad	0.047 μRad
Eje Y	0.20 μRad	0.03 μRad

Tabla 5.1. Comparativa de ruido entre el sistema comercial CR800 y el sistema desarrollado

MAREAS OCEÁNICAS

El sistema de medidas de mareas lleva en funcionamiento desde el 29 de noviembre de 2013 en el puerto de Los Cristianos, en el sur de la isla de Tenerife ($28^{\circ}02'51.2''N$; $16^{\circ}43'07.3''W$) registrando mareas oceánicas con un sensor comercial, Vegamet 381 [Vegamet 381 2015]. En paralelo al equipo desarrollado, se ha utilizado otro sistema de adquisición de datos comercial especializado en estas medidas, LogoSens [OTT LogoSense 2 2015].

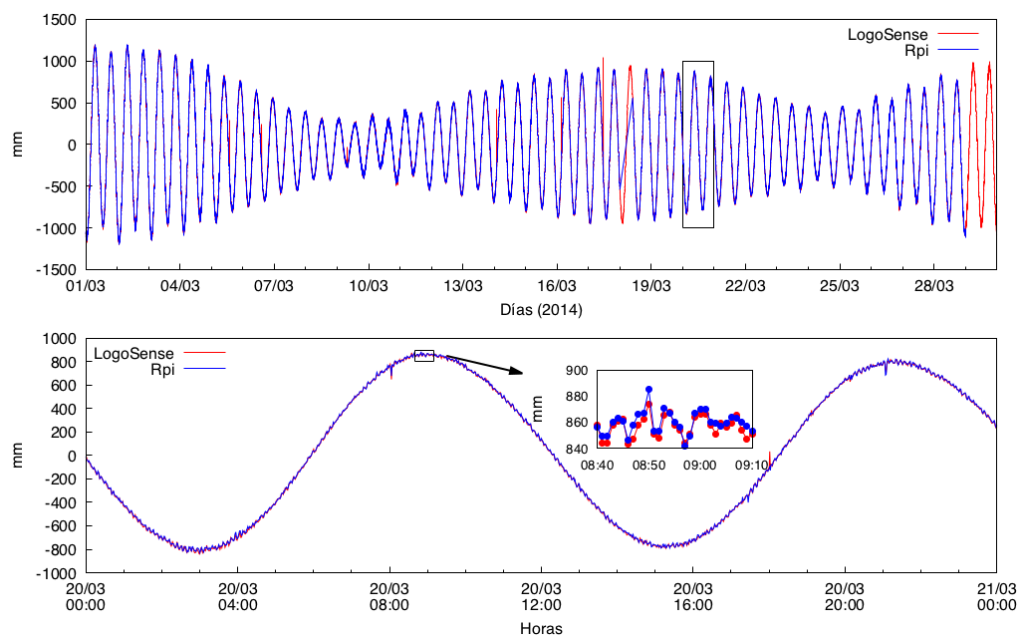


Figura 5.7. Registro de 30 días de la marea oceánica con un sistema de adquisición comercial y el desarrollado en este proyecto. En la gráfica superior se representa en color rojo el datalogger comercial (LogoSense) y en color azul el datalogger desarrollado en este proyecto (Rpi). En la gráfica inferior se presenta la misma señal en un periodo de 24 horas y un detalle del ruido de ambos equipos.

La señal representada en la Figura 5.7 corresponde a un ciclo completo de 30 días, donde se aprecian las mareas vivas, cuando la luna se encuentra alineada con el sol, y las mareas muertas, cuando la Luna y el Sol forman con la Tierra un ángulo de 90° . Se han representado las señales adquiridas por el sistema comercial *Vegamet-LogoSense* y por el desarrollado en este trabajo. La señal en detalle hace referencia al ruido de la señal, este ruido es la suma del ruido electrónico más el oleaje ya que la medida no se hace sobre una lámina estática de agua. Aún así el ruido resultante de sumar el aporte electrónico y el oleaje es menor de 2 cm. Se podría reducir ese valor si se realizase el mismo proceso que en el sistema del inclinómetro, en el que la muestra de cada minuto es el resultado del valor medio de las muestras tomadas cada segundo.

REGISTRO DE IMÁGENES

El sistema de monitorización a través de imágenes lleva en funcionamiento sin averías más de un año en diferentes puntos geográficos de la isla de Tenerife con la finalidad de ver la actividad en el cráter del Teide, único punto en el que hay actividad fumarólica continuada. Actualmente se encuentra instalado en tres puntos, Montaña Rajada ($28^\circ 15' 53.1''\text{N}$; $16^\circ 35' 48.6''\text{W}$), Parador de Las Cañadas del Teide ($28^\circ 13' 27.9''\text{N}$; $16^\circ 37' 37.1''\text{W}$) y cráter del Teide ($28^\circ 16' 18.9''\text{N}$; $16^\circ 38' 32.2''\text{W}$). La zona a monitorizar, debido a su altitud, posee un clima

de alta montaña, siendo habituales las nevadas y las temperaturas bajo cero en invierno. Por otra parte, durante el día la luz es muy intensa, pudiendo afectar a la calidad de las imágenes. Cada día se generan 1.3 Gbytes de imágenes pese a que cada imagen ha sido comprimida y durante la noche no se toman imágenes (Figura 5.8). La gran ventaja del uso de este sistema en comparación con otras cámaras que ofrecen prestaciones similares, es su bajo coste.



Figura 5.8. Sistema de monitorización de imágenes. A la izquierda, el sistema de monitorización a través de imágenes. A la derecha una imagen del cráter tomada por este sistema, donde se puede observar el color amarillo característico de las zonas de fumarola.

5.1.1 Características del sistema

Con el objetivo de conseguir la máxima autonomía del sistema gestionado remotamente, se han seleccionado componentes de bajo consumo (Tabla 5.2).

Componente	Voltaje (V)	Consumo (mA)	Consumo (mW)
A/D	3,3	0,4	1,32
VRef	3,3	0,05	0,15
RTC	3,3	0,2	0,66
DC-DC	9-36	30	0,27
RPi	5	200	1000
Total	-	230,65	1002,4

Tabla 5.2. Consumo del sistema de adquisición con Linux embebido.

En la Tabla 5.3 se muestra una comparativa de prestaciones y coste, entre diferentes sistemas de adquisición comerciales y el desarrollado en el trabajo de Tesis (versión 1). Actualmente, todos los equipos se encuentran integrados en el Sistema de Vigilancia Volcánica que el Instituto Geográfico Nacional tiene operativo en Canarias.

Producto	Descripción	Coste
DT-85G (dataTaker)	48 Analog I/O, 4 Digital I/O. RS232/485, ETH, USB MODBUS RTU/TCP	4.000 €
DT-80 (dataTaker)	15 Analog I/O, 12 Digital I/O. RS232/485, ETH, USB MODBUS	3.000 €
CR800 (Campbell Scientific)	6 Analog I/O, 4 Digital I/O. RS232	1.000 €
Datalogger diseñado	Raspberry Pi, Raspberry Pi Camera, A/D 16 bits, RTC, PCB Arduino UNO + Sensores	156€

Tabla5.3. *Datalogger comerciales vs datalogger diseñado*

5.2 Sistema adquisición empleando Linux embebido y microcontrolador

Uno de los motivos expuestos en el apartado 3.2 para desarrollar un sistema de adquisición nuevo era conseguir un sistema de mayor resolución, para poder registrar señales de pequeña magnitud especialmente de cara a su uso en sismología. Así mismo se busca también mejorar la relación señal/ruido. Para testear el sistema de adquisición desarrollado a partir del microcontrolador PIC32MX450F256H y el microordenador, se le inyectó a una de las entradas del convertidor A/D AD7714 una señal continua generada por un calibrador ISO-TEC ILC-421, variando su amplitud de 175 mV a 25 mV (Figura 5.9). También se conectó una batería de tipo AA en otro de los canales del convertidor A/D AD7714. La frecuencia de muestreo del sistema se fijó en 5 segundos.

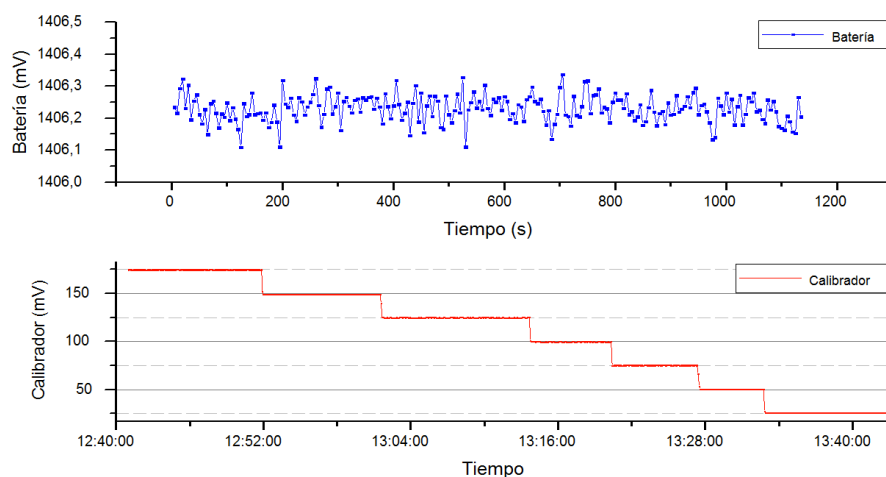


Figura 5.9. Representación del voltaje de una pila de tipo AA durante 20 minutos (arriba) y de la señal de un calibrador (abajo), variando esta última de 175 mV a 25 mV en el periodo de una hora.

Para cada nivel de la señal de excitación se hace un tratamiento estadístico (Tabla 5.4). Se puede observar que la desviación estándar para la pila es sensiblemente inferior a la del calibrador en cualquiera de los niveles de éste, por tanto el sistema de adquisición tiene un ruido intrínseco inferior al del calibrador. Además, observando la Tabla 5.5 sobre las características del calibrador, para 150 mV se observa una incertidumbre de ± 0.6 mV.

Nivel (mV)	Puntos	Media (mV)	σ (mV)	Min (mV)	Max (mV)
175	128	174,605	0,065	174,446	174,772
150	112	148,895	0,063	148,689	149,076
125	142	124,928	0,081	124,623	125,119
100	76	99,734	0,073	99,531	99,872
75	81	75,325	0,073	75,175	75,487
50	61	50,477	0,070	50,329	50,642
25	126	25,820	0,072	25,683	25,966
Pila	227	1406,23	0,043	1406,109	1406,338

Tabla 5.4. Estadística de los datos obtenidos.

DC mV source		
Range	Display Resolution	Accuracy
- 199.9 mV to + 199.9 mV	0.1 mV	$\pm (0.25 \% FS + 1 d)$
* Output measured load impedance should > 1 K ohms.		
* FS : full scale		

Tabla 5.5. Características de la salida de voltaje del calibrador ISO-TECH ILC-421

REGISTRO DE TEMPERATURA

El sistema posteriormente se instaló en una zona de anomalía térmica en el complejo volcánico Teide-Pico Viejo (28° 16' 11.1"N, 16° 38' 25.9" W), con el fin de estimar el flujo de calor procedente del subsuelo. Consta de cuatro sensores de temperatura instalados a diferentes profundidades (10, 30, 50 y 70 cm) (Figura 5.10), de tal forma que el más superficial está más afectado por las condiciones meteorológicas [Moure, D. et al. 2016].

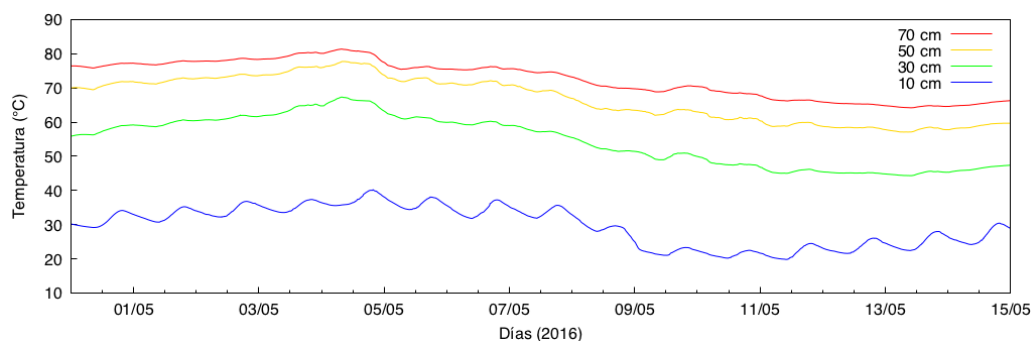


Figura 5.10. Temperatura registrada a 10, 30, 50 y 70 cm de profundidad en mayo de 2016 (1-15).

Además, el sistema dispone de entradas digitales que permiten la medida de parámetros atmosféricos esenciales para la interpretación de los datos (Figura 5.11). Debido a que el volumen de datos a transmitir es pequeño y se quiso alcanzar un consumo mínimo de energía no se utilizó el sistema con Linux embebido, en su lugar se utilizó un módulo GPRS (SIM900A).

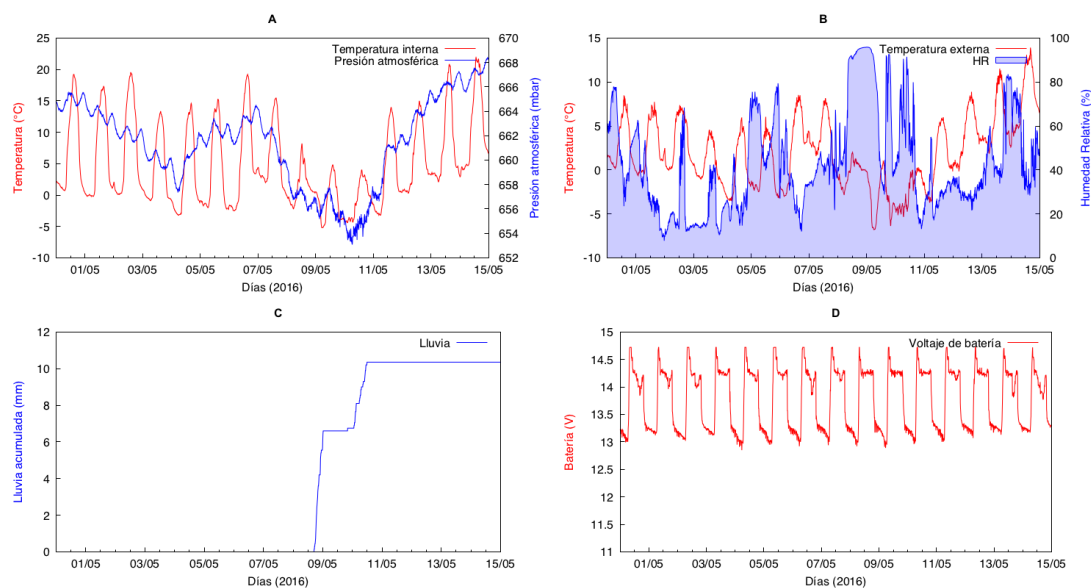


Figura 5.11. Datos meteorológicos. *A)* Presión atmosférica (mb) y temperatura del sistema (°C). *B)* Humedad relativa y temperatura ambiente (°C). *C)* Lluvia acumulada (mm). *D)* Evolución de la batería (V). Todas las gráficas comprenden el periodo desde el 1 de mayo al 15 de mayo de 2016

5.2.1 Características del sistema

El sistema permite la medida de señales con un alto nivel de resolución, siendo posible medir temperaturas por debajo de la décima de grado. Además debido a su bajo consumo (Tabla 5.6), incluso transmitiendo datos en tiempo real, permite que el sistema funcione durante meses alimentado solo con baterías, facilitando su instalación en zonas de difícil acceso.

Modo	Consumo (mA) @ 12V	Consumo (mW)
Sleep	0.4	4.8
Transmitiendo	10	120
Sincronizando (NTP)	6.5	78

Tabla 5.6. Consumo del dispositivo en sus posibles estados

Su bajo coste es otro aspecto a destacar (78.48 €), ya que al ser instalados en zonas con ambientes extremos pueden dañarse, y su reposición es poco costosa.

5.3 Sistema de adquisición empleando microcontrolador y convertidor AD7193

En el apartado 4.1 se indicó que la frecuencia generada por el receptor GPS introduce ruido electrónico en el conversor, debido a que ésta invade la parte analógica. Para evaluar esta inducción, se ha inyectado una señal generada por un calibrador de 150 mV de continua en un canal del conversor AD771. Se aprecia en la Figura 5.12 una señal de alta frecuencia que alcanza un valor mínimo de 150 mV y un máximo de 160 mV, con un valor medio de 153 mV. Esta señal es debida a las dos señales generadas por el GPS, el pulso por segundo (PPS) y la señal de 2.4 MHz.

Para que el equipo pueda registrar señales sísmicas de pequeña amplitud y no queden enmascaradas por el ruido electrónico generado, se debe evitar el uso de una frecuencia tan alta de reloj y eliminar su efecto en la parte analógica. Esto lleva a replantear el modo de funcionamiento y fue el motivo que llevó a cambiar de conversor A/D, pasando del AD7714 al AD7193.

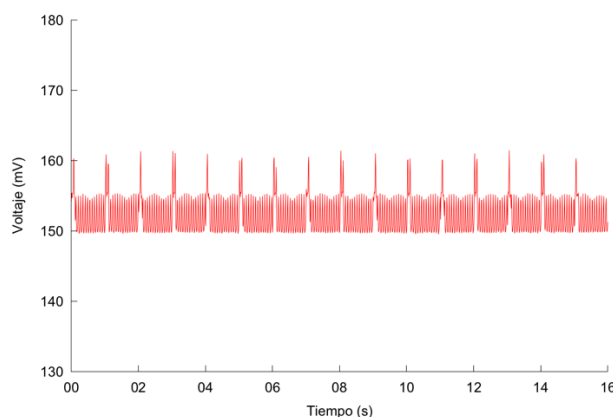


Figura 5.12. Representación de la medida de un voltaje de 150 mV introducido mediante un equipo generador de voltaje de continua utilizado para calibrar equipos, ISO-TEC ILC-421

El conversor AD7193, al ser un conversor delta-sigma, dispone de dos filtros digitales de tipo sinc (por su forma en el dominio temporal de la función $\frac{\sin x}{x}$), de grado 3 y 4 que permiten a los conversores de este tipo conseguir altas resoluciones. Para ayudar a elegir el filtro adecuado se tomó como referencia una señal continua de 180 mV generada por el calibrador ISO-TEC ILC-421 (Tabla 5.5). Se seleccionaron varias frecuencias de muestreo, todas ellas lo suficientemente altas (350, 450 y 500 Hz) para que el tiempo de estabilización

fuera inferior a 10 ms, que es el periodo de muestro (100 Hz) habitual en sismología y que fueron las condiciones impuestas en ecuaciones [5] y [6] (Figura 5.13).

Observando los resultados estadísticos (Tabla 5.7), vemos que el valor de error medido por el conversor está dentro de la exactitud de calibrador para esa escala de medida y que la opción del filtro SINC4 a 450Hz de muestreo es la opción que aporta menor valor medio de ruido al sistema.

El fabricante indica que para frecuencias bajas ambos filtros presentan un nivel de ruido similar, aunque el filtro sinc3 tiene la ventaja de tener un tiempo de estabilización menor. Para frecuencias superiores a 960.9 Hz, es preferible usar el filtro sinc4 debido a que ofrece un mejor rendimiento. Atendiendo a las tablas disponibles en la documentación del conversor, se indica que para sinc4 y muestreo de 300 Hz se tiene una resolución pico a pico de 19.4 bits y para 960 Hz de 18.4 bits. Sin embargo para el caso de sinc3, utilizando la misma frecuencia de muestreo tiene una resolución pico a pico de 19.3 bits y para una frecuencia de muestreo de 960 Hz una resolución de 17.9 bits. Atendiendo a lo expuesto previamente, el filtro sinc4 ofrece mejor resolución a igual tiempo de muestreo. Sin embargo el filtro sinc3 tiene un tiempo de estabilización menor, pudiéndose reducir la frecuencia de muestreo y reducir el nivel de ruido.

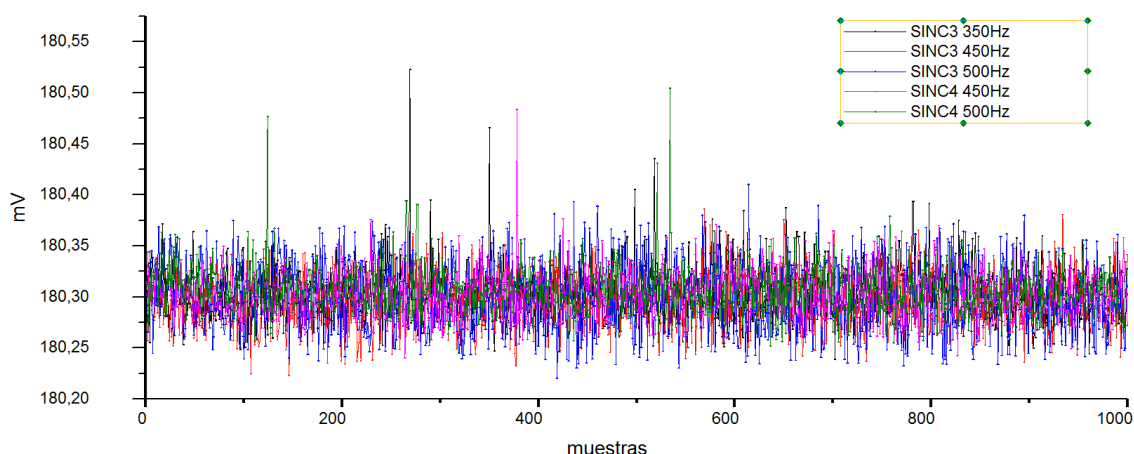


Figura 5.13. Voltaje registrado con distintas configuraciones del conversor A/D al medir una señal de 180 mV.

	Número de puntos	Media (mV)	2*σ (mV)
SINC3 350Hz	1000	180.303	0.053
SINC3 450Hz	1000	180.296	0.054
SINC3 500Hz	1000	180.300	0.070
SINC4 450Hz	1000	180.304	0.045
SINC4 500Hz	1000	180.307	0.047

Tabla 5.7. Estadística de los datos obtenidos.

Finalmente se escoge el filtro sinc de grado 3 y 350 Hz de frecuencia de muestreo del conversor, ya que es la frecuencia más baja que podemos escoger y porque la diferencia con respecto al mejor resultado de la Tabla 5.7 (sinc4 a 450Hz) es insignificante. De acuerdo a esta elección de filtro y muestreo, el conversor tendrá un tiempo de estabilización de 8.6 ms., inferior al tiempo requerido de 10 ms.

Es obvio que el tiempo de estabilización, definido como el tiempo que transcurre desde que se recibe un flanco de la señal de 100Hz hasta que el conversor tiene la primera muestra disponible, se ve afectado por la temperatura, ya que afecta a los relojes del sistema pero no lo suficiente como para que este pierda estabilidad. Se han construido tres sistemas que formarán un array de tres elementos. En la Figura 5.14 se muestra el tiempo de estabilización de estos tres sistemas, funcionando durante 36 horas.

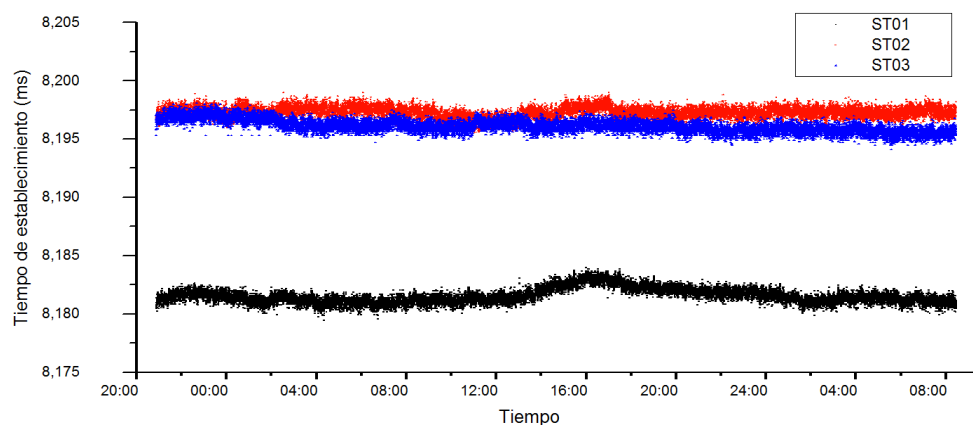


Figura 5.14. Representación gráfica del tiempo de estabilización de tres estaciones diferentes durante 36 horas.

Se puede observar como los sistemas poseen un tiempo de estabilización constante (Tabla 5.8).

	Valor medio (ms)	$2 \cdot \sigma$ (ms)	Mínimo (ms)	Máximo (ms)
ST01	8.1815	0.0013	8.1795	8.1840
ST02	8.1973	0.0009	8.1956	8.1990
ST03	8.1961	0.0011	8.1941	8.1981

Tabla 5.8. Estadística de los valores obtenidos.

El tiempo de estabilización de la tabla 5.8 difiere del teórico (8.6 ms), debido a que la frecuencia de muestreo se proporciona mediante un valor de 10 bits, mediante la ecuación de muestreo $\frac{MCLK}{FS \cdot 1024}$ donde $MCLK$ es la frecuencia del conversor, que en este caso es de 4.92 MHz y FS es el valor de 10 bits que se debe proporcionar al conversor. De esta forma, para una frecuencia de muestreo de 350 Hz se obtiene un valor de 13.73 para FS . Como FS debe ser entero, se toma el valor de 13, siendo entonces la frecuencia de muestreo real de 369,59 Hz y el valor del tiempo de estabilización de 8.12 ms., que difiere del real debido a las tolerancias de los relojes, sobre todo en el caso del conversor, que usa su reloj interno con una tolerancia de $\pm 4\%$. También, como se puede observar en la Figura 5.14, su estabilidad se ve afectada por las variaciones de temperatura aunque su efecto es despreciable.

Atendiendo a la tolerancia del reloj de los conversores de los distintos sistemas, se puede determinar si en el peor de los casos se mantendría un error temporal entre conversores inferior a 1 ms (Tabla 5.9).

Muestreo máximo (Hz)	Muestreo mínimo (Hz)	Tiempo establecimiento mínimo (ms)	Tiempo establecimiento máximo (ms)	Diferencia (μs)
384.375	354.375	7.805	8.455	650

Tabla 5.9. Sincronismo que mantendrían distintos conversores si fueran puestos en funcionamiento al mismo tiempo. En el caso más extremo se tendría una diferencia de 650 μ s.

Al describir el formato de los datos (apartado 4.3) se presentaba la cabecera que describe los datos del paquete adquirido, que contiene, entre otras informaciones, las medidas de tiempo contabilizadas por el microcontrolador. Una de ellas es el *tiempo hasta la primera muestra*, que no es otra cosa que el tiempo de estabilización de la primera muestra de cada paquete (asumimos que el tiempo es el mismo en las siguientes muestras). Aunque se dice que la muestra queda determinada con una resolución de 0.1 μ s, esto no es real, puesto que se está cometiendo un error que depende en gran medida de la temperatura y la tolerancia del reloj cuarzo. Teniendo en cuenta las características del fabricante del cristal de cuarzo y tomando las peores condiciones (Tabla 5.10), la variación en frecuencia del reloj puede ser como máximo de ± 150 ppm, lo que implica que el error cometido al temporizar la primera muestra es despreciable, incluso teniendo en cuenta el envejecimiento del componente. Atendiendo a la estabilidad de esta medida (Tabla 5.10), considerando que las estaciones se encontrarán muy próximas entre sí (centenares de metros) y por tanto, no existirán grandes

variaciones de temperatura entre ellas, puede considerarse que cada equipo tomará la muestra correspondiente con un error inferior a 1 ms, en el peor de los casos no superior a 650 μ s.

Rango de frecuencia	3.20 MHz a 70.00 MHz
Tolerancia a 25°C	± 30 ppm típico ± 100 ppm máximo
Estabilidad con la temperatura	± 50 ppm típico ± 100 ppm máximo
Rango de temperatura	-20°C a 70°C estándar -40°C a 85°C extendido
Envejecimiento	± 5 ppm al año

Tabla 5.10. *Propiedades del cristal de cuarzo del microcontrolador*

Un último test es importante para verificar que las tres estaciones pueden funcionar como array; verificando que las muestras de cada sistema independiente se toman en el mismo instante. Para ello se ha seleccionado un cuarto GPS que proporciona una salida de pulso por segundo (PPS) y se ha introducido en la entrada analógica de cada uno de los equipos. Con esta prueba se pretende verificar que el número de muestras entre PPS y PPS de un GPS externo es el mismo para todos los equipos y que cada muestra se encuentra también en la misma posición temporal (Figura 5.15). El GPS que hace de generador de PPS se ha programado para que la duración del pulso por segundo sea de 100 ms.

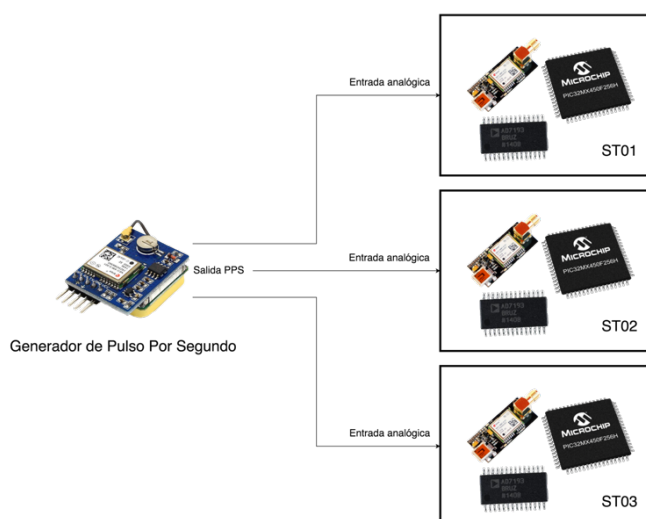


Figura 5.15. *Diagrama del test realizado para verificar el sincronismo de los equipos*

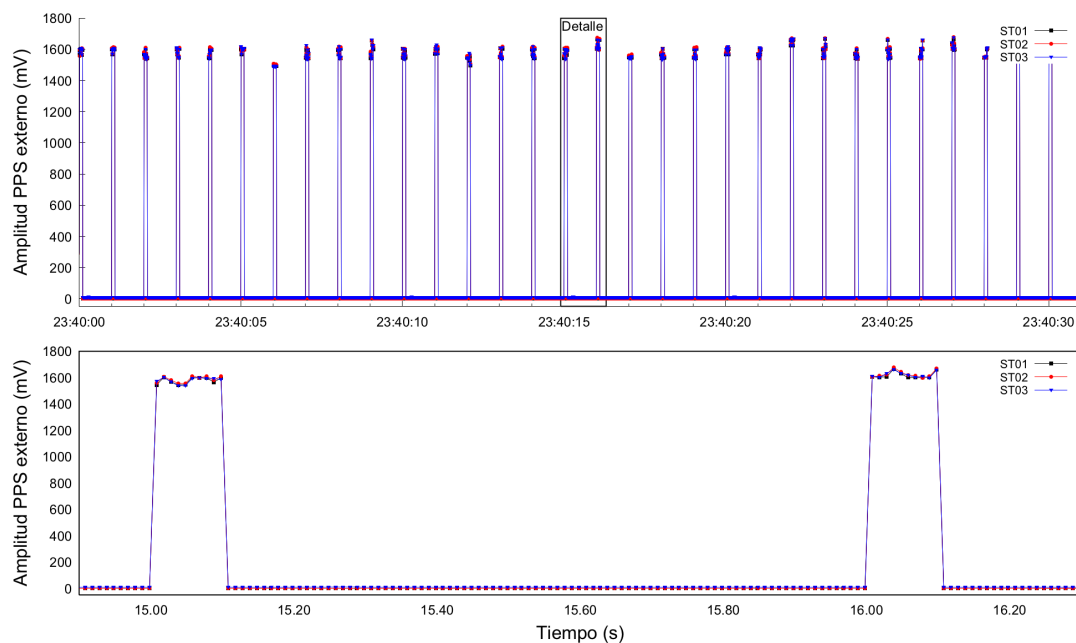


Figura 5.16. Resultado del test del PPS generado por un cuarto GPS. Se pueden observar los pulsos adquiridos por los tres equipos y el detalle de las muestras entre dos PPS.

Los PPS procedentes del cuarto GPS son adquiridos por cada una de las estaciones en el mismo instante. Nótese, en la gráfica de detalle (Figura 5.16), que todas las estaciones siguen la entrada analógica de la misma forma en cada una de sus muestras. Se puede observar también que la duración del PPS en todas las estaciones es de 100 ms (10 muestras) y que el número de muestras entre PPS y PPS es de 100, es decir 100 muestras por segundo.

Los equipos también se han sometido a un test de ruido electrónico para comprobar que serán capaces de medir pequeñas señales sísmicas (Figura 5.17). Este test se ha realizado sin el sensor, en su lugar se ha utilizado el calibrador ISO-TECH ILC-421 con una señal continua de 150 mV.

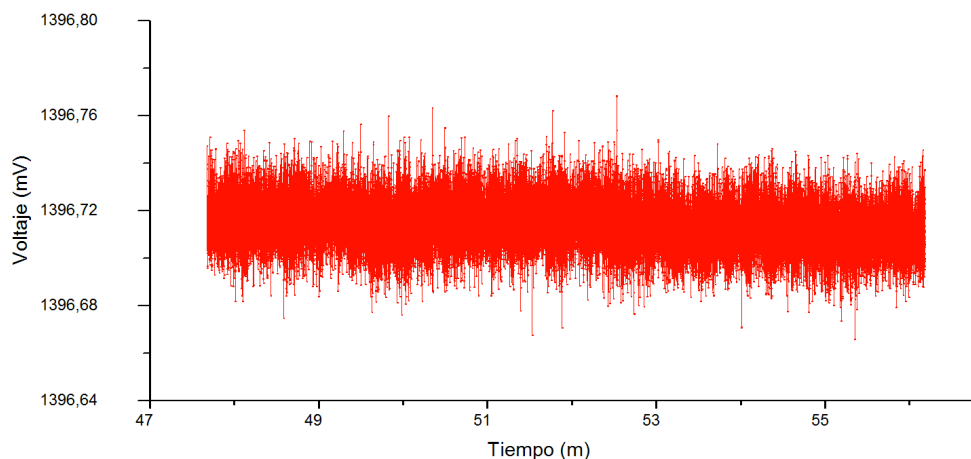


Figura 5.17. Voltaje de 150 mV medido por el sistema desarrollado. Las características del acondicionador de señal hace que la señal de 150 mV esté sumada a un offset de 1250 mV, necesario para que la señal sísmica pueda variar entre 0 y 2500 mV de pico a pico, que es el margen de entrada del A/D.

Número de muestras	Media (mV)	2* σ (mV)	Mínimo (mV)	Mediana (mV)	Máximo (mV)
51000	1396.7144	0.0196	1396.6661	1396.7139	1396.7683

Tabla 5.11. Estadísticas del ruido medido

El ruido observado en el sistema (Tabla 5.11) es de ± 0.0196 mV, por lo que se tienen 17 bits libres de ruido. Teniendo en cuenta que el fabricante asegura una resolución pico a pico de 19.3 para 300 Hz, que es el valor más cercano al utilizado, se ha conseguido que el sistema total tenga solamente 2 bits de ruido.

Los tres equipos contruidos están formados por cinco bloques: sistema de adquisición y receptor satélite (vistos hasta ahora), sistema de alimentación, sistema acondicionador de señal y sensor.

Como sensor sísmico se ha utilizado el MARK L4 de 1Hz (Anexo A. Tabla A.9.), se ha diseñado un sistema acondicionador de señal (Anexo B. Figura B.1., Figura B.2.) que amplifica, filtra y adapta la señal del sismómetro al margen de entrada del conversor (Figura 5.18).

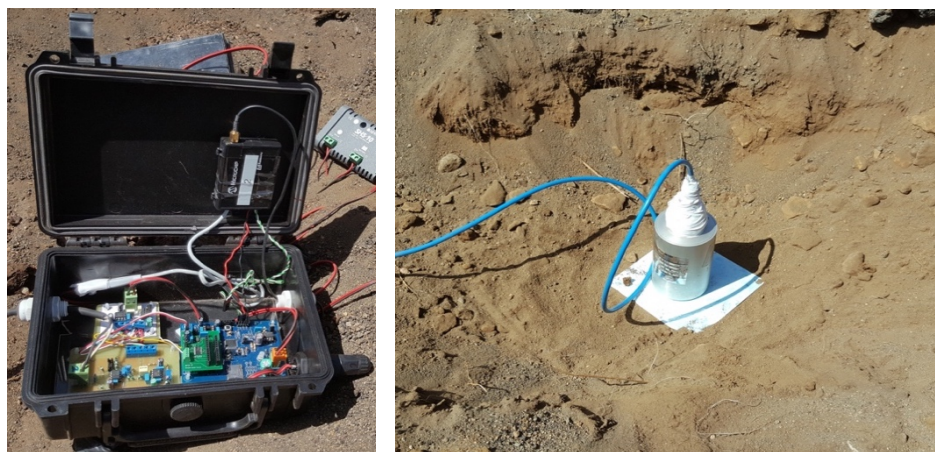


Figura 5.18. Estación sísmica desarrollada. En la imagen de la izquierdase observa la estación construida, durante su instalación en febrero de 2017. En ella se pueden distinguir: la placa PCB de la alimentación (en la caja arriba a la izquierda), el amplificador y filtro (en la caja abajo a la izquierda), el sistema de adquisición (en la caja abajo a la derecha) y por último, el GPS en la tapa de la caja. En la imagen de la derecha el sensor sísmico utilizado.

5.4 Validación en campo de una estación sísmica

El Instituto Geográfico Nacional cuenta, desde agosto de 2016, con un array sísmico cableado en Las Cañadas del Teide (Tenerife) (Figura 5.19), formado por 9 sensores sísmicos, ocho de ellos de componente vertical y uno de tres componentes.



Figura 5.19. Localización del array sísmico del IGN. En este emplazamiento se han realizado las pruebas con las estaciones desarrolladas.

Los sensores sísmicos de componente vertical son los mismos que los empleados en el trabajo de tesis, Mark L4, y se conectan a dos sistemas de adquisición de datos comerciales idénticos, Nanometrics Centaur. Uno de los sensores verticales se conecta a los dos digitalizadores con el fin de verificar que el muestreo ocurre en el mismo instante.

Los equipos desarrollados en esta Tesis se instalaron junto a tres de los sismómetros que forman este array (Figura 5.20).

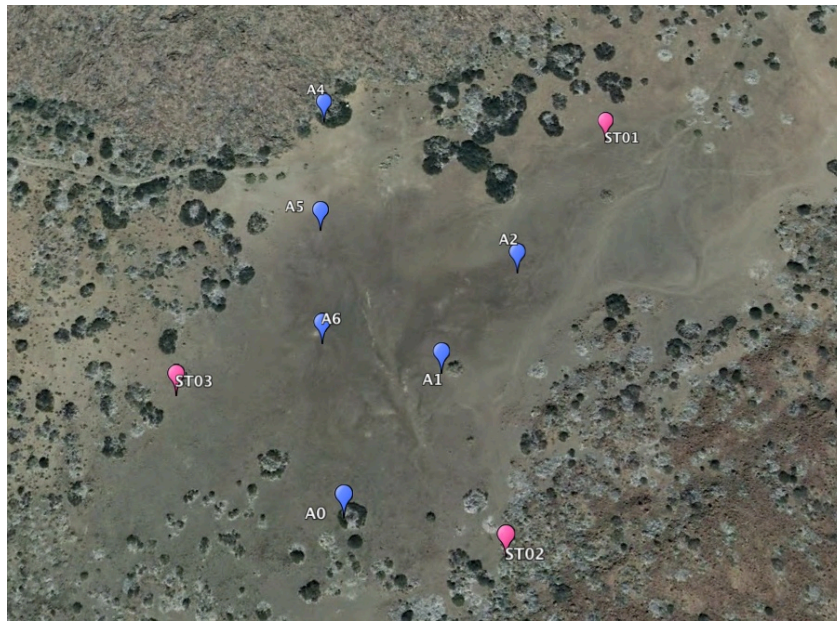


Figura 5.20. Localización de los sistemas desarrollados. Los equipos se instalaron en el mismo emplazamiento que tres de los sensores que forman el array, formando un triángulo de gran apertura.

Durante el tiempo que las tres estaciones estuvieron operativas se registraron varios eventos sísmicos, dos de ellos muy claros (Figura 5.21)

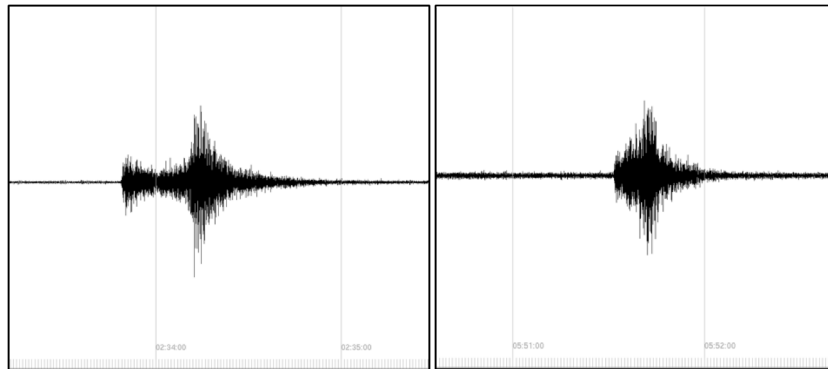


Figura 5.21. Registro en ST02 de uno de los sismos registrados en las tres estaciones desarrolladas. A la izquierda, evento de magnitud 3.4mbLg a 230 Km de distancia. A la derecha, evento de magnitud 1.9mbLg a 50 Km

En la Figura 5.22 se muestra la comparación entre una de las estaciones desarrolladas y el sensor del array cableado con el que comparte emplazamiento. La respuesta ante el evento de 3.4mbLg es similar. Además, atendiendo al comienzo del evento, se observa que se produce en el mismo instante en ambos sistemas.

La respuesta en frecuencia de las estaciones construidas es muy similar a aquellas con las que se ha comparado (Figura 5.23), aunque las desarrolladas presentan un contenido en alta frecuencia superior, debido al filtro anti-alias utilizado. El sistema de acondicionamiento de señal diseñado, posee un filtro Butterworth de segundo orden con frecuencia de corte en 25Hz, que presenta una pendiente en la banda de atenuación de 40 db/década. Este filtro permitirá el paso de altas frecuencias más fácilmente que el filtro anti-alias utilizado en el equipo comercial, cuyo filtro presenta una atenuación de 140db a la frecuencia de Nyquist, es decir, a 50 Hz.

La diferencia en el espectro de las estaciones distantes, es debido fundamentalmente al suelo sobre el que están instaladas, que permite que se transmitan más fácilmente unas frecuencias que otras.

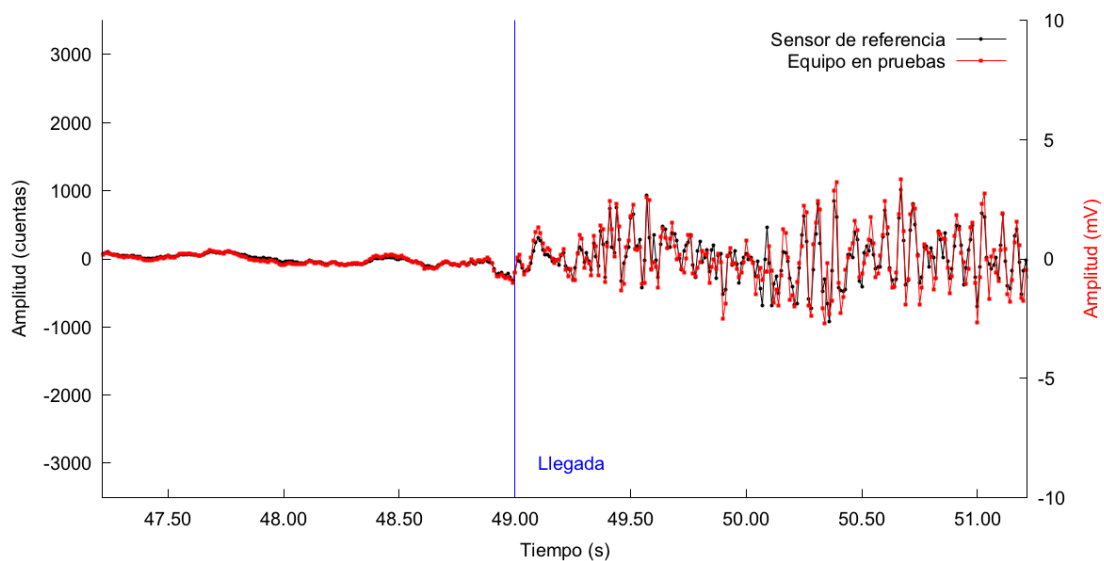


Figura 5.22. Comparativa del registro del array cableado y uno de los equipos desarrollados. La señal representada es un detalle de la llegada de un evento de magnitud 3.4 mbLg

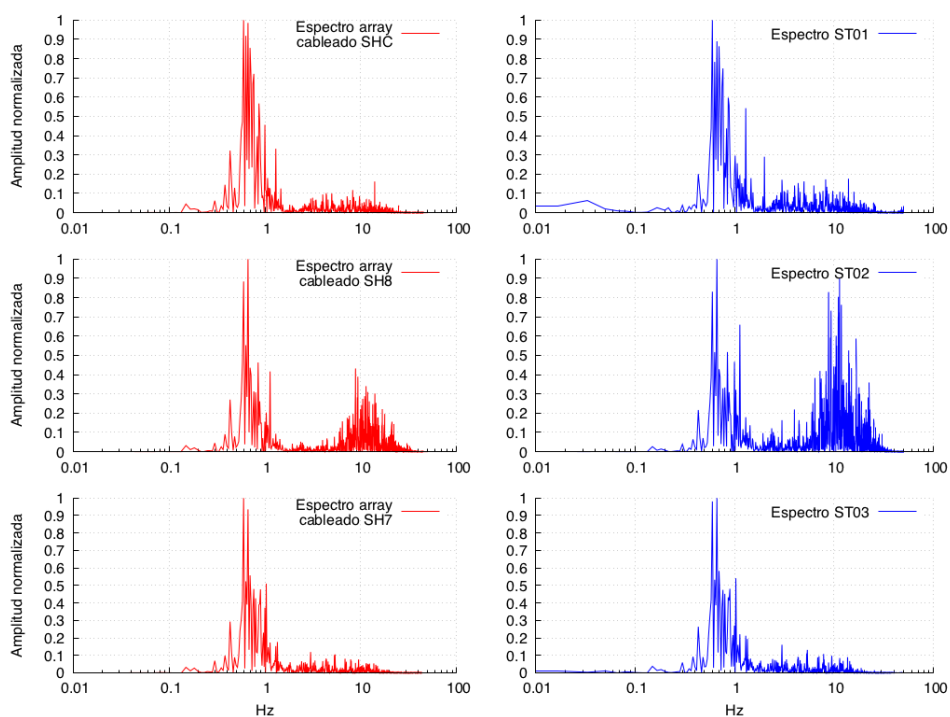


Figura 5.23. Comparativa del espectro de una señal de un minuto de duración, que contiene un evento de magnitud 1.9mbLg, registrado en las estaciones comerciales cableadas (rojo) y en los equipos construidos (azul).

En la Figura 5.23 también se observa una componente de baja frecuencia importante, inferior a 2 Hz, es debida al microsismo o ruido de fondo, que es tanto de origen natural como antrópico.

La relación señal/ruido de ambos equipos también es muy similar. En la figura 5.24 se observa cómo la evolución de la energía es prácticamente igual en cada par de estaciones (comercial y desarrollada), así como la señal en el tiempo. La evolución de la energía sísmica se ha obtenido calculando la densidad espectral de potencia (PSD) en ventanas de 5 segundos con solapamiento de 4 segundos durante el minuto que dura la señal mostrada. Una vez obtenida la PSD en cada ventana se ha normalizado la señal, es decir, se ha dividido por el mayor valor. Nótese que, tomando un punto representativo del ruido y teniendo en cuenta que se ha dividido por la potencia espectral de la señal (el máximo), si se hace la inversa de este valor, se calcula su logaritmo decimal y se multiplica por 10, se obtiene la relación señal/ruido.

Sensor	SNR (db)
ST01	47.1
SHC	51.2
ST02	57.6
SH8	59.4
ST03	48.8
SH7	48.7

Tabla 5.12. *Relación señal ruido calculada para el evento estudiado. En azul las estaciones construidas.*

Esta relación se utiliza solamente para hacer una comparación numérica entre las estaciones comerciales cableadas y los equipos bajo test. Como se puede ver en la Tabla 5.12, la relación señal ruido es similar, pudiendo por tanto detectar ambos equipos eventos de igual amplitud mínima.

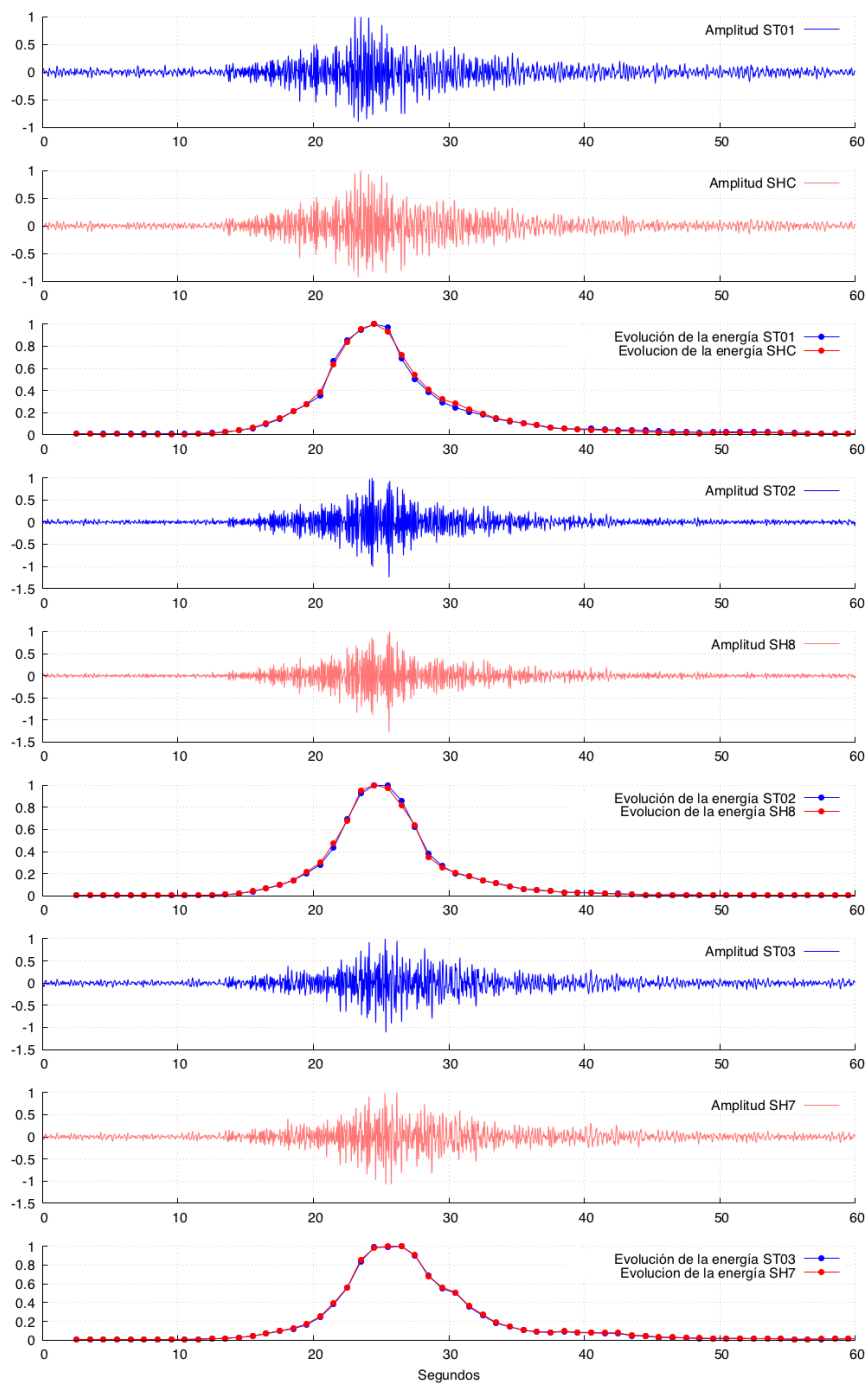


Figura 5.24. Representación de la señal registrada en cada estación, junto con la evolución de la potencia espectral. En azul el equipo desarrollado y en rojo los sensores del array cableado.

5.5 Validación en campo del array sísmico

La técnica de análisis de una señal sísmica debe ser la más adecuada para cada tipo de señal. Por ejemplo, una señal de tremor puede ser estudiada mediante correlación cruzada, o

en caso de que existan dos señales superpuestas, puede utilizarse otro algoritmo como MUSIC [Schmidt, R.O. 1986] [Goldstein, P.; Archuleta, R. J. 1978]. Si hablamos de eventos sísmicos discretos en el tiempo, primero se debería detectar la señal utilizando algún algoritmo de detección de eventos (por ejemplo STA/LTA) y luego aplicar el cálculo únicamente al evento.

De las distintas técnicas que se utilizan en el procesado de arrays sísmicos, en esta Tesis se ha utilizado la técnica de formación del haz (beam-forming).

La técnica de formación de haz tiene como objetivo el cálculo del azimut y de la lentitud del evento sísmico a estudiar, a partir del retraso existente entre los diferentes sensores del array. La implementación de este método se ha realizado de la siguiente forma:

- Supongamos que recibimos una señal en nuestro array. Tomaremos como referencia uno de los sensores, es decir, no tendrá retraso ($\Delta t = 0$).
- Se realiza un barrido de todos los ángulos posibles que pueda tomar el azimut; este cálculo se realiza para cada una de las lentitudes posibles, el cual a su vez nos proporcionará un Δt para cada uno de los sensores.
- Se desplazan entonces las señales de cada uno de los sensores con sus correspondientes retrasos. Una vez desplazadas, se suman todas a la señal de referencia.

Para poder discernir qué azimut y lentitud son las correctas, se hace una comparación entre una magnitud proporcional a la energía de la señal con la misma magnitud para el ruido (medido segundos antes del evento), es decir, determinamos el coeficiente SNR; teniendo como resultado aquel valor que nos proporcione un máximo de este coeficiente entre todas las combinaciones posibles.

En la Figura 5.25 se presenta un mapa de los terremotos localizados por el Instituto Geográfico Nacional en la última quincena de marzo y primera de abril. Se representa en colores el error en ángulo cometido en su localización (Tabla 5.13), mediante la técnica de beam-forming, considerando como exacta la localización dada por el IGN.

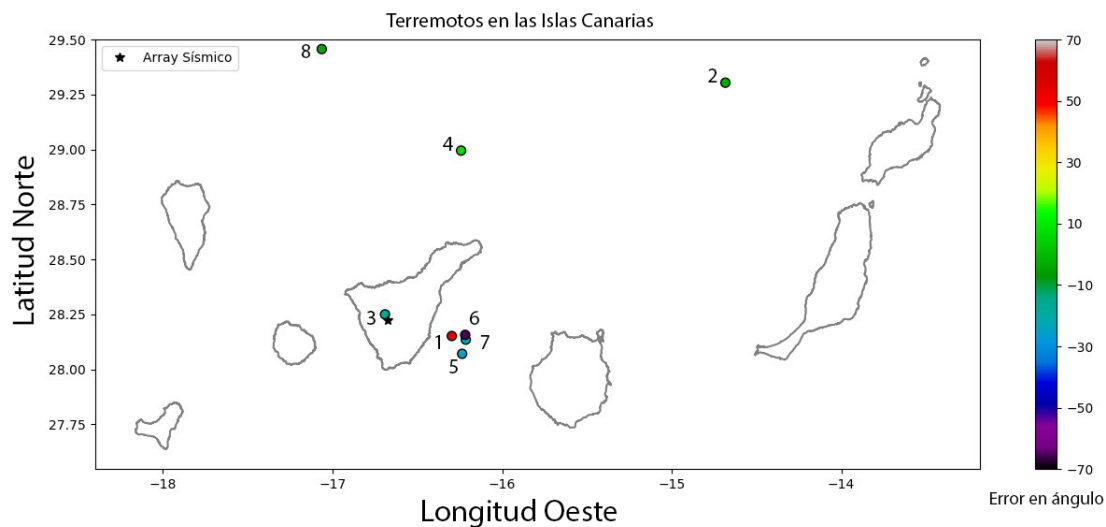


Figura 5.25. Representación de sismos localizados por la Red Sísmica Nacional del IGN durante el periodo de 10 de marzo al 13 de abril de 2017. La escala de colores representa el error cometido en el cálculo mediante la técnica de beam-forming.

Evento	Tiempo origen	Azimut teórico (°)	Azimut calculado (°)	Error (°)
1	10/03/2017 05:51:24	101,074	47,883	53,191
2	14/03/2017 02:33:17	61,536	65,000	-3,464
3	06/04/2017 06:06:53	326,043	341,588	-15,545
4	09/04/2017 03:11:43	29,293	22,756	6,537
5	10/04/2017 01:01:04	109,459	134,275	-24,816
6	10/04/2017 17:11:44	98,553	163,736	-65,183
7	13/04/2017 01:15:21	342,448	346,446	-3,998
8	13/04/2017 01:30:40	101,124	123,325	-22,201

Tabla 5.13. Errores en el azimuth calculado mediante el array de tres componentes para los eventos localizados en el periodo de 10 de marzo al 13 de abril de 2017.

La primera conclusión que se desprende de estos datos es que un array compuesto por únicamente tres estaciones es insuficiente para obtener valores de error bajos, aunque permite obtener una primera aproximación de la localización.

Los eventos localizados en el norte son los que tienen menor errores, debido a la propia configuración geométrica del array. Las señales provenientes del norte se registran en cada uno de los sensores con diferencias temporales mayores que la de las señales que provienen del sureste, produciendo un gran error en la determinación de la dirección (Figura 5.26).



Figura 5.26. Dirección de llegada de las ondas de los eventos sísmicos que se producen entre las islas de Tenerife y Gran Canaria. Las estaciones ST01 y ST02 reciben las señales con muy poca diferencia temporal.

Se ha testeado (Tabla 5.14) el tiempo de cálculo para el análisis en un ordenador de altas prestaciones y en un ordenador con Linux embebido (Raspberry Pi). En el caso del sistema con Linux embebido los tiempos de computación son mucho mayores, alcanzándose 74 segundos de media para procesados de ventanas de 90 segundos, un tiempo muy superior a la duración de los eventos sísmicos analizados en este trabajo. Es obvio que si se aumenta el número de estaciones a tratar, este tiempo también aumentará, aunque hay que tener en cuenta que estos eventos se producen con horas o días de diferencia.

Equipo	Procesador	Memoria	Iteraciones	Tiempo medio (s)
MacOs	Intel Core 2 Duo 3.06 GHz	8Gb DDR3	10	4
RaspberryPi	4xCortex-A53 1.2GHz	1Gb LPDDR2	10	74

Tabla 5.14. Comparativa del tiempo de cálculo del algoritmo de beam-forming en dos ordenadores con distintas prestaciones.

5.6 Características del sismómetro del array diseñado

5.6.1 Pruebas de comunicación

Cada estación transmite un paquete de datos cuando finaliza el tiempo programado que define el tamaño del paquete. En las pruebas realizadas, los datos son transmitidos cada cinco segundos, con un tamaño de paquete de 1527 bytes, invirtiendo menos de dos segundos en su transmisión. Se han testado varios módulos de comunicación inalámbrica, buscando características tales como bajo coste, bajo consumo y fácil implementación.

Se han comparado varios módulos de bajo consumo especialmente diseñados para su uso con microcontroladores, utilizando interfaces serie SPI o UART para su interacción (Tabla 5.15). Con los módulos de DIGI se hicieron pruebas de alcance en dos ambientes diferentes. Con el modelo XBee-PRO se logró realizar un enlace de 11 km, utilizando antenas de 18dBi en ambos puntos, uniendo la zona de telescopios de Izaña (Tenerife) con el flanco este del complejo volcánico Teide-Pico Viejo (Figura 5.27 A). Por otro lado el módulo XBee-xb24 se utilizó para realizar un enlace de 400 metros en el interior de una galería (Río de Guía) situada próxima a este mismo Parque Nacional (Figura 5.27 B), obteniéndose una recepción continua y sin pérdidas de datos.

Fabricante	Marca/Modelo	Estándar	Consumo (mW)	Precio (€)
DIGI	XBee-xb24	IEEE 802.15.4	132	31,88
DIGI	XBee-Pro	IEEE 802.15.4	709.5	37,49
Microchip	RN171	IEEE 802.11 g/b	396	37,18
Espressif	ESP8266/ESP-07	IEEE 802.11 g/b/n	561	6,99

Tabla 5.15. Módulos testeados para su uso como transmisores del array sísmico inalámbrico.



Figura 5.27. Pruebas de comunicaciones con los módulos de DIGI. **A)** Enlace de 14 Km entre el edificio volcánico Teide-Pico Viejo e Izaña. **B)** Galería Río de Guía

Los módulos de Microchip y Espressif son de especial interés puesto que utilizan el estándar IEEE 802.11(Wi-Fi 2.4 GHz). Los equipos habilitados con wifi (por ejemplo ordenador, teléfono o reproductor de música) pueden conectarse a internet a través de un punto de acceso directamente. Esto hace que los módulos no necesiten otro semejante para comunicarse, como ocurre con los módulos de DIGI testeados. De esta forma, cada estación puede conectarse directamente a través de un punto de acceso al ordenador con Linux embebido de forma local y transmitirle los datos, para que luego este realice el procesamiento y pueda enviar una solución. Ambos módulos fueron testeados consiguiendo distancias de centenares de metros, y aunque el módulo de Espressif puede ser programado para que realice además otras funciones, ya que posee incluso un entorno de programación en Python, el módulo de Microchip ofrece una configuración más sencilla, pudiendo realizar una conexión UDP o TCP en muy pocos pasos.

La comunicación entre los nodos y el sistema Linux embebido puede hacerse indistintamente utilizando TCP o UDP pero este último no da lugar a retrasos en las comunicaciones ya que es un protocolo no orientado a conexión, y aunque también es más susceptible a pérdidas, estas son asumibles debido a la gran cantidad de información sísmica que transmite.

Una vez evaluado el alcance del módulo de RF, se debe verificar el correcto envío de paquetes de datos. Para ello se ha realizado el montaje del módulo de comunicaciones en el equipo de adquisición sísmica desarrollado, enviando así los datos por radiofrecuencia. El módulo se ha conectado a la red wifi del laboratorio y se ha recibido en un ordenador utilizando un software libre para su representación (OpenFramework). La señal

transmitida se produce con un generador de funciones (AimTTI TG550) que inyecta una señal sinusoidal de 1Hz de 2V pico a pico a la entrada analógica de la estación, donde son digitalizados y enviados mediante UDP (Figura 5.28).

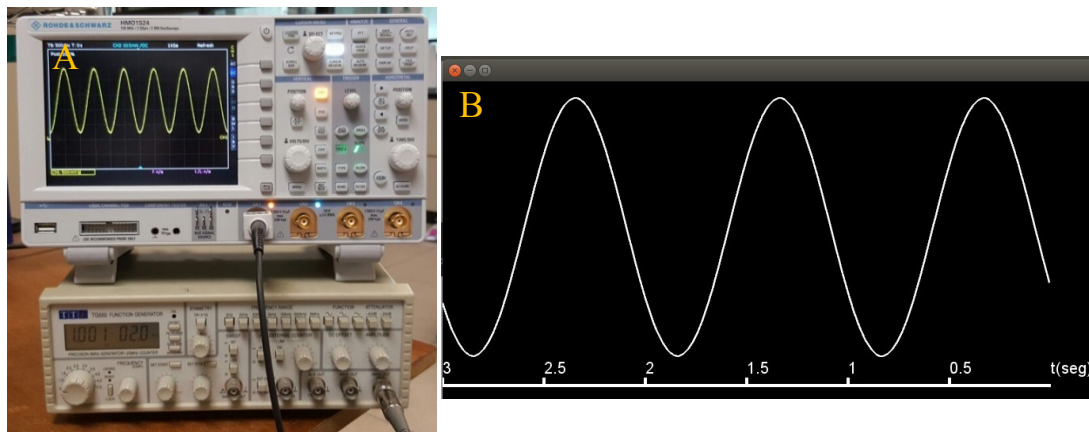


Figura 5.28. Test de recepción de datos. *A) Señal de 2V pico a pico y frecuencia de 1 Hz generada por el generador de funciones TG550 de AimTTI. B) Señal obtenida en un ordenador de la red LAN.*

Otra de las pruebas de comunicación realizadas ha sido empleando el estándar IEEE 802.15.4 que especifica la capa física (transmisor de radio) y de control de acceso al medio para WSN. El objetivo principal de IEEE 802.15.4 es proporcionar capacidades de comunicación confiables y eficientes en energía para redes inalámbricas de baja velocidad de datos. El controlador para el desarrollo del estándar 802.15.4 elegido es el protocolo ZigBee, aunque existen protocolos competidores como WirelessHART e ISA100.11a que también usan la PHY 802.15.4 pero definen sus propias capas MAC y de red [Petersen et al. 2008]. Con el fin de obtener un protocolo de eficiencia energética, los dispositivos inalámbricos del sistema PTP desarrollados se comunican entre sí a través del protocolo de comunicación HDLC, donde el esquema de comunicación sugerido se basa en una conexión punto a multipunto que utiliza tramas de datos estándar transmitidos a través de paquetes estándar IEEE 802.15.4. IEEE 802.15.4 es compatible con redes inalámbricas de baja velocidad, funciona a 20/40/250 kbps y utiliza la banda de 915 MHz / 2.4 GHz, con un alcance de hasta 100 m. Los dispositivos PTP se han implementado con módulos comerciales inalámbricos Xbee PRO, a partir del cristal MC13193 [MC13193 Online] de 16 MHz \pm 40 ppm. La deriva de reloj y el desplazamiento entre los nodos de sensores inalámbricos se registraron empleando un osciloscopio digital Tektronix TDS 784D de 1GHz, 4GS/s y 4 canales. El osciloscopio mide el retardo de las señales PPS generadas por cada dispositivo. En la Figura 5.29 se ilustra la configuración del

experimento para obtener la desviación del reloj entre los relojes de libre funcionamiento maestro-esclavo.

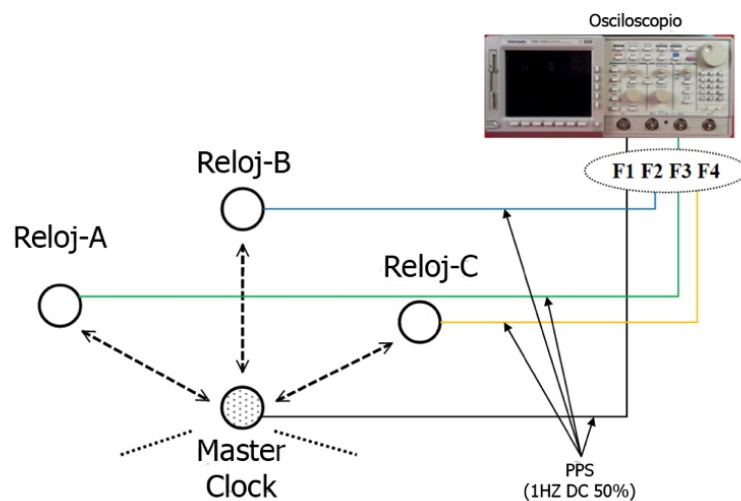


Figura 5.29. Configuración de las mediciones del sincronismo en la topología en estrella

Las medidas (Figura 5.30) se han realizado entre el reloj que hace de master, que genera un PPS (señal F1) y tres nodos esclavos que generan tres señales PPS (F2, F3 y F4).

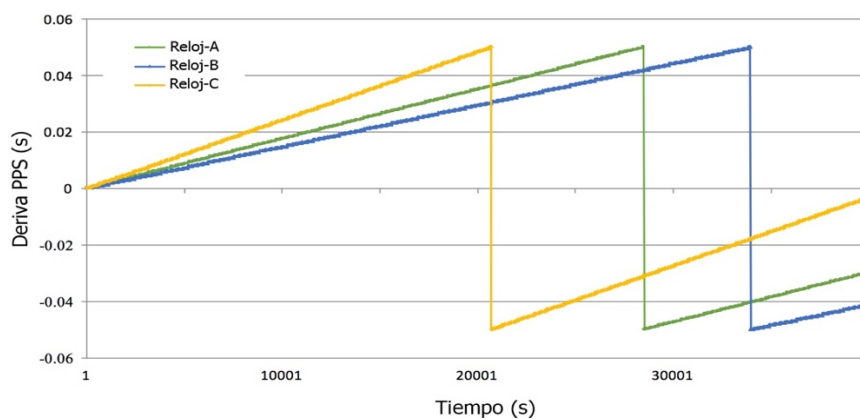


Figura 5.30. Derivas entre los diferentes relojes corriendo libremente.

La Figura 5.30 muestra las desviaciones de tiempo entre el reloj maestro y los esclavos. El (Reloj A) deriva 1.74 μ s en un segundo, el (Reloj B) 1.47 μ s en un segundo y el (Reloj C) 2.41 μ s en un segundo. La precisión del protocolo PTP para la topología de red *en estrella* se

medió para un intervalo de sincronización de 5 segundos y un intervalo de solicitud de retardo de 10 segundos. La compensación entre el reloj en tiempo real del maestro y los esclavos se registró durante un período de 24 horas.

La sincronización de tiempo máxima alcanzada en los experimentos realizados ha sido de aproximadamente 1 μ s. Por tanto, es de interés en zonas inaccesibles a la señal de GPS, como túneles y/o galerías, pero presenta el inconveniente de un limitado alcance y de precisar un elevado tráfico de mensajes para mantener operativo el sincronismo. Estas limitaciones, y dado que los módulos GPS empleados en la sincronización, con fácil acceso a la red satelital, ya cumplían con los objetivos propuestos, se decidió no extender la experimentación a pruebas de campo, y dejar abierta la experimentación para futuras líneas de trabajo.

5.6.2 Pruebas de consumo

Considerando que el GPS debe permanecer activo y el muestreo es de 100Hz, el sismómetro se ha desarrollado para minimizar su consumo y poder conseguir la máxima autonomía del sistema. Se ha seleccionado una fuente de alimentación lo más eficiente posible, utilizando fuentes no lineales que tienen como ventaja reducir el consumo, pero con la desventaja de introducir ruido de conmutación en el sistema. Aun así, el ruido electrónico generado es aceptable para la medida de las señales sísmicas que se tratan de adquirir, como se puede ver en las Tablas 5.11 y 5.12.

En primer lugar, se han seleccionado los diferentes componentes que forman el módulo de control y gestión comparando diferentes integrados comerciales. En las Tablas 5.16, 5.17, y 5.18 se muestran las principales características de algunos de los dispositivos evaluados (microcontrolador, convertidores A/D, módulo GPS) a los que habrá que sumar el consumo de los diferentes sensores.

Marca	Modelo	Reloj (MHz)	Bits	Consumo (mW)	Precio (€)
Texas Instruments	MSP430F5438A	20	16	23,5	10
Texas Instruments	LM3S8962	50	32	158	11
Microchip	PIC32MX450F256H	20	32	33	4
Microchip	PIC24FJ64GB002	32	16	37	4

Tabla 5.16. Comparativa entre microcontroladores

Marca	Modelo	Muestreo	Resolución	Consumo	Precio (€)
Texas Instruments	ADS1246	2000 sps	24 bits	2,3 mW	6,93
Texas Instruments	ADS1248	2000 sps	24 bits	2,3 mW	8,016
Cirrus Logic	CS5522	617 sps	24 bits	6 mW	8,29
Analog Devices	AD7193	4800 sps	24 bits	17,5 mW	8,03

Tabla 5.17. Comparativa de convertidores analógico/digital

Marca	Modelo	Frecuencias de salida	Consumo (W)	Canales	Precio (€)
Furuno	GF-8701	1 Hz/10 MHz	0.55	26	--
Ublox	NEO-M8T	2 Programables	0.1	72	80
Pletronics	GT11005	1 Hz/10 MHz	0.6	50	332.73

Tabla 5.18. Comparativa de GPSDO. GPS con salida de reloj disciplinado.

De los microcontroladores evaluados de la tabla 5.16 se seleccionó un PIC32MX450F256H principalmente por disponer de 4 canales DMA y por poseer la posibilidad de asignar diferentes pines a un determinado periférico, facilitando el diseño sobre la PCB evitando realizar tramos largos de pistas.

En cuanto al conversor A/D, se escogió el de Analog Devices porque es el que mayor resolución en cuanto bits pico a pico ofrecía para la tasa de datos que se necesitaba.

El GPS de la marca Ublox es el que mejor características ofrece [Anexo A Tabla A.8], en cuanto a precio, consumo, tamaño, etc.

La fuente de alimentación seleccionada fue una fuente conmutada de la firma Maxim (MAX638) y un inversor de la firma Intersil (ICL7660) responsables de alimentar el PCB del acondicionador de señal y el GPS. El sistema de adquisición tiene su propia alimentación, también compuesta por un MAX638.

En cuanto al sistema de acondicionamiento de señal del sensor, se ha utilizado un amplificador de instrumentación de la firma Texas Instruments (INA118) y un amplificador operacional, también de Texas Instruments (TL061), con el que se ha hecho el filtro paso-bajo Butterworth de segundo orden que filtra las señales por encima de 25 Hz.

El consumo del sistema completo se puede ver en la Tabla 5.19, en la que se desglosa el consumo de cada placa de circuito.

Elemento	Consumo (mW)
Datalogger	119,76
Alimentación Gps y Previo	2,52
GPS	213,6
Previo	3,36
Transmisor	176
Total	515,24

Tabla 5.19. *Detalles de consumo total de una estación sísmica y sus elementos*

Considerando que la ubicación en la que se instalará el sistema es Las Cañadas del Teide (Tenerife), que tiene una irradiancia media de 2583.7 Wh/m² en el mes de diciembre [Agrocabildo 2017], el sistema necesitará 1 panel de 10W y una batería de 12 Ah (Figura 5.31), que le da una autonomía de 10 días en caso de que se instale sin panel, según los datos aportados en la Tabla 5.20. En el cálculo de los paneles necesarios se ha tenido en cuenta la latitud a la que se encuentran las islas y la inclinación del panel a 35° para conseguir máxima irradiación tanto en verano como en invierno.

Consumo total (W)	Voltaje	Consumo diario (W*h/día)
0,515	12	12,36
HSP (Hora Solar Pico)	3	
Número de paneles	0,45 (1)	
Capacidad baterías (Ah)	12	
Autonomía (días)	10	

Tabla 5.20. Cálculo del número de paneles y capacidad de la batería.



Figura 5.31. *Imagen de una de las estaciones instalada con un panel de 10 W y una batería de 12V y 12 Ah.*

Capítulo 6

Conclusiones

Se ha alcanzado el objetivo final de esta Tesis, desarrollando un sistema de monitorización de propósito general y bajo coste aplicado a vigilancia volcánica. El equipo posee gran versatilidad, ya que mediante la inclusión de diferentes sensores ha permitido el desarrollo de sistemas de medida de gravedad, deformación, mareas oceánicas y de monitorización a través de imágenes, ofreciendo en todos ellos una excelente relación señal-ruido. Su versatilidad ha radicado en el uso de las últimas tecnologías tanto en hardware como en software, facilitando el desarrollo de aplicaciones en el entorno internet. De ese modo, el uso de un sistema Linux embebido nos ha permitido trabajar con una gran variedad de lenguajes de alto nivel.

A partir del sistema de adquisición desarrollado para la monitorización de parámetros ambientales, se ha construido un sistema de adquisición de datos sísmicos: robusto, fiable y de bajo coste. El equipo ha sido empleado positivamente en la creación de un array sísmico inalámbrico, validado en pruebas de laboratorio y campo.

Hoy en día, la mensajería instantánea ha evolucionado hacia aplicaciones móviles, aplicaciones multiplataforma, e incluso a servicios web que no necesitan de ninguna aplicación para funcionar, este es el caso de aplicaciones como: Facebook, Messenger, Skype, Whatsapp o Telegram. El sistema desarrollado en el trabajo de Tesis hace uso de este tipo de aplicaciones, en concreto de Telegram Messenger, que permite la comunicación a través de cualquier dispositivo electrónico tipo PC, smartphone o tablet. En cualquier momento se puede solicitar al equipo, a través de este software de mensajería instantánea, el estado general del sistema o de las baterías, una gráfica del registro con el sensor especificado o una foto tomada.

6.1 Aportaciones

En este apartado se explican las diferentes aportaciones específicas conseguidas en el presente trabajo de Tesis:

Sistema de adquisición multiparamétrico

Desarrollo de un sistema de adquisición multiparamétrico de bajo coste para monitorización volcánica aplicable a gravimetría, geodesia, así como también en el seguimiento visual de la actividad volcánica. El sistema de adquisición se ha desarrollado empleando un *system on chip* (SoC) de Broadcom BCM2835 con sistema operativo Linux (basado en Debian™) que permite la construcción de un completo sistema de monitorización, ofreciendo múltiples posibilidades en cuanto a almacenamiento, procesamiento de datos, configuración y seguimiento en tiempo real de la actividad volcánica.

El sistema de adquisición multiparamétrico presentado se complementa con el desarrollo de un entorno software para esta plataforma, además de distintos módulos hardware acondicionadores según el parámetro a monitorizar. El equipo ha sido aplicado y validado en la monitorización de: mareas oceánicas, deformación del terreno, gravedad, monitorización a través de imágenes en la isla de Tenerife y deformación del terreno en la isla de El Hierro.

Las principales ventajas de este desarrollo frente a otros existentes es su bajo coste y homogeneidad, lo que facilita su mantenimiento. Debido a que los fabricantes de distintos sistemas de adquisición quieren satisfacer las necesidades de los usuarios, sus productos son cada vez más completos, incorporando muchos tipos de sistemas de comunicación, así como multitud de canales analógicos y digitales con el fin de ser usados con cualquier tipo de sensor, esto hace que el producto se encarezca enormemente. El sistema desarrollado en el trabajo de Tesis utiliza una electrónica simple pero efectiva, el diseño de los distintos programas creados para la explotación de los datos también se facilita por el hecho de trabajar en un entorno Linux, si además se suma el bajo coste de todos sus componentes. Las ventajas de utilizar este sistema son obvias.

Se trata de un sistema abierto, de tipo embebido Linux, donde todo el software utilizado es libre, que permite configurar y visualizar los datos que se están registrando en

tiempo real, a través de una página web y de un software de mensajería instantánea, con el fin de poder realizar un seguimiento de la actividad en cualquier parte e instante. Es un sistema de bajo ruido, siendo capaz de medir variaciones pequeñas del parámetro bajo estudio con tan solo 2 bits de error de sus 16 bits de resolución. Esto supone que, para aplicaciones como la de medida de gravedad, cuente con un ruido inferior a 1 mV o 0.2 μGal (Figura 5.3). Se trata también de un sistema de bajo consumo, 200 mA alimentado a 12 voltios, teniendo en cuenta que posee conectividad con internet en todo momento. Este bajo consumo permite su funcionamiento con sistemas de energía renovable (paneles solares y/o aerogeneradores) y facilita la instalación en zonas aisladas y de difícil acceso. Esto es idóneo para la vigilancia volcánica, pues permite instalar el equipo en lugares remotos y de bajo ruido como es el caso de las galerías, donde se consigue tener un sistema que presenta una gran estabilidad térmica, con variaciones no superiores a 0.2°C (Figura 5.5). Se trata de un sistema de bajo coste, menor del 10% del coste de otros dataloggers comerciales, por lo que su mantenimiento se facilita al poder contar con muchas unidades.

Resultados recogidos en los trabajos realizados con la participación del doctorando:

- "Use of low-cost acquisition systems with embedded Linux for volcanic monitoring".
David Moure, Pedro Torres, Benito Casas, Daniel Toma, María José Blanco, Joaquín Del Río, Antoni Mànuel Lázaro. *Sensors* 2015, 15(8), 20436-20462; doi:10.3390/s150820436 ISSN 1424-8220
- "Low power and high efficiency energy acquisition systems for volcano monitoring".
David Moure, Pedro Torres. *Proceedings of the 19 Symposium IMEKO TC 4*, Barcelona, Spain, July 18-19, 2013

Sistema de adquisición para sísmica y sincronización

En una segunda fase, se ha construido un sistema de adquisición de datos sísmicos, incidiendo en la sincronización y la relación señal/ruido.

Los retardos en la toma del dato pueden ser fatales en un sistema de alta frecuencia de muestreo, como son las medidas en sismología. El hecho de que un sistema operativo como Linux, tenga la misión de tomar el dato en un instante determinado puede comprometer la medida, debido a que su ejecución está a merced de las tareas que esté ejecutando en ese momento. Por ese motivo al sistema de adquisición multiparamétrico previamente

desarrollado, se le añadió un microcontrolador (PIC32MX450F256H), capaz de realizar las medidas en el instante requerido.

En vigilancia sísmica es frecuente tener que detectar una señal de baja amplitud en un registro altamente ruidoso, por esto es importante disponer del suficiente número de bits que permitan una buena relación señal/ruido. En el diseño se pasó de un convertidor de 16 bits a 24 bit y se consiguieron las siguientes mejoras:

- El sistema de adquisición construido tiene un ruido intrínseco inferior al del calibrador ISO-TECH ILC-421 (Tabla 5.4).
- Permite la medida de temperatura con resolución por debajo de la décima de grado (Figura 5.10) (zona de anomalía térmica en el edificio Teide en Las Cañadas del Teide).
- Bajo consumo (Tabla 5.6), incluso transmitiendo datos en tiempo real, permite que el sistema funcione durante meses solo con baterías

La medida de parámetros que evolucionan más rápidamente en el tiempo requiere la mejor sincronización del dato adquirido. En el caso concreto de un array sísmico, en el que la onda atraviesa el campo de sensores muy rápidamente, hay que asegurar un alto sincronismo temporal entre los distintos elementos del array. Experimentalmente se ha generado una señal sintética que atraviesa el array desde todos los ángulos variando los tiempos de llegada, provocando errores de sincronismo de 1ms, 5ms y 10ms, obteniendo para un milisegundo un error en la determinación del ángulo por debajo de 1 grado. Eligiendo para nuestro sistema de adquisición una frecuencia de muestreo como mínimo de 100 Hz, el error de sincronismo aceptable debe ser inferior al 10% del tiempo entre dos muestras consecutivas, que sería de 1ms.

El objetivo planteado inicialmente de investigar técnicas para aumentar la precisión de sincronización de tiempo en WSN, llevó a experimentar con el estándar IEEE 1588 PTP empleando módulos comerciales inalámbricos Xbee PRO. Aunque quedó constancia de su interés en zonas inaccesibles a la señal de GPS (sincronización del orden del μ s), no se realizaron pruebas de campo, ante el inconveniente de un limitado alcance y elevado tráfico de mensajes para mantener operativo el sincronismo. Se optó por los módulos GPS con fácil acceso a la red satelital, comprobando además en el trabajo de Tesis que presentan un error de sincronismo inferior a 1ms.

El conversor A/D dispone de una entrada de sincronismo (SYN) cuya función es habilitar el conversor en un momento determinado, de tal forma que al estar la señal de reloj sincronizada con el tiempo GPS, cualquier conversor A/D de la red de sensores adquiriría el dato en el mismo instante de tiempo, quedando así sincronizados. La primera conversión tendrá lugar transcurrido el tiempo de estabilización, que dependerá directamente de la frecuencia de muestreo, siendo mucho menor cuando la frecuencia aumenta. De esta forma, para reducir el tiempo de estabilización, habría que aumentar la frecuencia de muestreo. Este aumento de frecuencia conlleva una reducción en la resolución del conversor utilizado hasta el momento (AD7714), por ese motivo se cambió al conversor (AD7193) también de Analog Devices de 24 bits pero de alta frecuencia de muestreo. Con este nuevo conversor el equipo puede registrar señales sísmicas de pequeña amplitud y no quedan enmascaradas por el ruido electrónico generado. El consumo es de 515.24mW, que a falta de energías alternativas (panel solar, aerogenerador, célula peltier, etc.) con una batería de 12 Ah tiene una autonomía de 10 días.

Resultados recogidos en los trabajos realizados con la participación del doctorando:

- "Development of a wireless seismic array for volcano monitoring". David Moure, Daniel Toma, Antoni Manuel Lázaro, Joaquín Del Río, Normandino Carreras y María José Blanco. EGU General Assembly 2014, 27 April – 02 May 2014, Vienna (Austria)
- "Data Acquisition System for Volcano Monitoring With Real-Time Transmission, Low cost and Low Power Consumption". Moure, D., Torres, P., Toma, D. M., Del Río, J., Mánuel, A. 21th Symposium IMEKO TC4 September 7-9. 2016. Budapest Hungary

Array sísmico, presentación y procesado de la información

Empleando el sensor sísmico MARK L4 de 1Hz y el sistema de adquisición basado en el conversor (AD7193), se han construido tres estaciones sísmicas para validar su uso como array sísmico. Atendiendo a la tolerancia del reloj de los conversores de los distintos sistemas, se ha verificado que, en el peor de los casos, el error de sincronismo es de 650 μ s, inferior a 1 ms (Tabla 5.9).

El equipo completo fue sometido a un test de ruido electrónico empleando el calibrador ISO-TECH ILC-421 con una señal continua de 150 mV. El ruido observado en el sistema (Tabla 5.11) fue de ± 0.019 mV, quedando 17 bits del A/D libres de ruido. Teniendo en cuenta que el fabricante asegura una resolución pico a pico de 19.3 para 300 Hz, que es el valor más cercano al utilizado, se ha conseguido que el sistema total pierda solamente 2 bits debidos al nivel de ruido.

En la gráfica de detalle (Figura 5.16), se observa que todas las estaciones siguen la entrada analógica de un cuarto GPS de la misma forma en cada una de sus muestras. Queda así reflejado el alto sincronismo que existe entre las estaciones.

Se toma como referencia uno de los sensores que forma parte del array cableado que el Instituto Geográfico Nacional tiene instalado en Las Cañadas del Teide (Tenerife) (Figura 5.19), y se compara con una estación desarrollada en el trabajo de Tesis, ubicada en el mismo emplazamiento (Figura 5.18). En la Figura 5.22 se observa la respuesta similar ante el evento de 3.4mbLg, constatándose además el mismo tiempo de llegada de la onda sísmica. La relación señal/ruido de ambos equipos es similar, al igual que la evolución de la energía en cada par de estaciones (comercial y desarrollada) como se aprecia en la Figura 5.24. Se puede concluir que cada pareja de equipos (comercial y desarrollado), detectan eventos de igual amplitud mínima, pero el coste y versatilidad del sistema desarrollado en el trabajo de Tesis es mucho mejor.

De las distintas técnicas que se utilizan en el procesado de arrays sísmicos se ha aplicado la técnica de formación del haz (beam-forming). Tomamos como referencia las localizaciones realizadas por el Instituto Geográfico Nacional en la segunda quincena de marzo y primera quincena de abril. En la Tabla 5.13 se presenta el error en ángulo cometido en la localización mediante beam-forming. La primera conclusión que se desprende de estos datos es que un array inalámbrico compuesto por tres estaciones es insuficiente. Los eventos 4 y 8 son los que mejores resultados han dado (8,45 grados de error) debido a la propia configuración geométrica del array y la disposición de los epicentros.

Por otro lado, el tiempo de computación es mucho mayor en Linux embebido (RaspberryPi) que con un ordenador de altas prestaciones, alcanzándose 74 segundos de media para procesados de ventanas de 90 segundos. Es obvio que si se aumenta el número de estaciones a tratar, este tiempo también aumentará, aunque hay que tener en cuenta que estos eventos se producen con horas o días de diferencia que facilitan su procesado.

Resultados recogidos en los trabajos realizados con la participación del doctorando:

- "Digital system for monitoring volcanic seismicity". Carreras, N., Gomariz, S., Manuel, A., Carbonell, M., Moure, A., Ortiz, R., Torres, P. International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC 2015), 11-14 May 2015. Pisa (Italy).
- "Small instrument to volcanic seismic signals". Normandino Carreras, Spartacus Gomariz y Antoni Manuel EGU General Assembly 2014, 27 April-02 May 2014, Vienna (Austria)
- "Development of a time synchronization methodology for a wireless seismic array". David Moure-García, Pedro Torres-González, Joaquín del Río, Daniel Mihai e Itahiza Dominguez. EGU General Assembly 2017, 23-28 April, Vienna (Austria)

6.2 Futuras líneas de trabajo

El trabajo de investigación realizado para la Tesis queda abierto a una serie de futuras líneas de trabajo:

- Ampliar el número de elementos del array. Como mínimo debe tener tantos elementos como tiene el array cableado que actualmente tiene instalado el IGN. Realizar diferentes topologías de sensores para minimizar el error en la estimación del ángulo de localización de terremotos en el entorno del complejo volcánico Teide-Pico Viejo.
- Aplicar a los resultados registrados otras técnicas que se utilizan en el procesado de arrays sísmicos distintas a la formación del haz (beam-forming). Una señal de tremor puede ser estudiada mediante correlación cruzada, o en caso de que existan dos señales superpuestas, puede utilizarse otro algoritmo como MUSIC.
- Mejorar los tiempos de procesado en tiempo real, utilizando lenguajes de programación compilados y no interpretados como es el caso de Python.

- Mejorar en la sincronización mediante la aplicación de módulos comerciales en pruebas de campo del IEEE 1588 PTP.
- La interfaz web como primer paso para el desarrollo del registro de sensores tiene un papel importante que debe ayudar a su validación a través del feedback recibido por sus usuarios. Como línea de futuro se propone el uso del estándar SensorML (Sensor Model Language), que posee una serie de plantillas para la implementación de este registro, su aceptación deberá ser estudiada dentro de la comunidad científica que emplea arrays sísmicos.

Capítulo 7

Bibliografía

7.1 *Publicaciones derivadas del trabajo de tesis*

7.1.1 *Revistas*

- "Use of low-cost acquisition systems with embedded Linux for volcanic monitoring". David Moure, Pedro Torres, Benito Casas, Daniel Toma, María José Blanco, Joaquín Del Río and Antoni Mànuel. Sensors 2015, 15(8), 20436-20462; doi:10.3390/s150820436 ISSN 1424-8220. Quartil Q1 en categoría Instruments & Instrumentation. Factor impacto 2.033 en 2015. (Citado 5 veces. Según Google Scholar Citations en mayo de 2017).
 - "Finger Scanner: Embedding a Fingerprint Scanner in a Raspberry Pi". J. Sapes, F. Solsona. Sensors 2016, 16(2), 220; mdpi.com; doi: 10.3390/s16020220.
 - "Ultraviolet Imaging with Low Cost Smartphone Sensors: Development and Application of a Raspberry Pi-Based UV Camera". TC Wilkes, AJS McGonigle, TD Pering, AJ Taggart. Sensors, 2016, 16(10), 1649; mdpi.com; doi: 10.3390/s16101649
 - "Environmental Technology Platform Architecture for In Situ Monitoring Forest Areas of Amazonian region—A case study in Maiandeuá Island, Brazil". OA Chase, A das Neves Carvalho. Environmental, 2016 - researchgate.net. IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN) www.iosrjen.org ISSN (e): 2250-3021, ISSN (p): 2278-8719 Vol. 06, Issue 08 (Aug 2016), V2 PP 08-15
 - "A Miniature Data Repository on a Raspberry Pi" Argyrios Samourkasidis and Ioannis N. Athanasiadis Information Technology Group, Wageningen

University, Hollandseweg 1, Wageningen 6706 KN, The Netherlands.
Electronics 2017, 6(1), 1; doi:10.3390/electronics6010001 Academic Editors:
Steven J. Johnston and Simon J. Cox

- "Using a single-board microcontroller and ADC to perform real-time sonar signal processing". Ben Travaglione. Proceedings of ACOUSTICS 2016 9-11 November 2016, Brisbane, Australia Defence Science and Technology Group, Australia
- "Design of a smart and wireless seismometer for volcanology monitoring". Normandino Carreras, David Moure, Spartacus Gomáriz, Daniel Toma, Antoni Mànuel, Ramón Ortiz. Volume 97, February 2017, Pages 174–185. Measurement ISSN: 0263-2241. Quartil Q2 en categoría Instruments & Instrumentation. Factor impacto 1.742 en 2015.

7.1.2 *Congresos*

- **Moure, D.;** Torres, P.A.; "Low Power and High Efficiency Energy Acquisition Systems for Volcano Monitoring", 19th Symposium IMEKOTC4 Symposium and 17th IWADC Workshop, ISBN-10: 84-616-5438-2; ISBN-13: 978-84-616-5438-3; pag: 436-439; Barcelona, Spain, 2013.
- **Moure, D.;** Torres, P.A.; Meletlidis, S.; López,C.; Blanco, M. J.; "Embedded multiparametric system for volcano monitoring", EGU General Assembly 2014, Vol.16, EGU2014-14421-1; Viena, Austria.
- **Moure, D.;**Toma, D.; Lázaro, A. M.; Del Río, J.; Carreras, N.; Blanco, M. J. "Development of a Wireless seismic array for volcano monitoring", EGU General Assembly 2014, Vol.16, EGU2014-15576-1; Viena, Austria.
- Luengo-Oroz, N.; Torres, P.A.; **Moure, D.;** D'Alessandro,W.; "Hidrogeochemical variations in groundwater periodically sampled at El Hierro (Canary Islands) and its relationships with the recent eruptive an unrest periods", EGU General Assembly 2014, Vol.16, EGU2014-5418; Viena, Austria.
- Luengo-Oroz, N.; Torres, P.A.; **Moure, D.;** D'Alessandro,W.; Liuzzo, M.; Longo, M.; Pecoraino, G.; "Diffuse CO2 flux emissions from the soil in Las Cañadas caldera (Tenerife, Canary Islands)", EGU General Assembly 2014, Vol. 16, EGU2014-9777-1; Viena, Austria.

- Normandino Carreras, Spartacus Gomàriz, Antoni Mànuel, Montserrat Carbonell, **Angel David Moure**, Pedro Antonio Torres, Ramón Ortiz. "Digital system for monitoring volcanic seismicity". IMTC 2015. Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings. May 11-14, 2015 Pisa Italy
- **David Moure**, Pedro Torres, "Data Acquisition System for Volcano Monitoring With Real-Time Transmission, Low cost and Low Power Consumption". 21th Symposium IMEKO TC4 Symposium and 19th IWADC Workshop. September 7-9. 2016. Budapest Hungary
- **David Moure**, Pedro Torres-González, Joaquín del Río, Daniel Mihai, and Itahiza Domínguez Cerdeña. "Development of a time synchronization methodology for a Wireless seismic array". EGU General Assembly 2017, Vol. 19, EGU2017-15826; Viena, Austria.
- Pedro Torres-González, **David Moure**, Natividad Luengo-Oroz, María Jiménez-Mejías, Ana Isabel Jiménez-Abizanda, Jose Manuel García-Fraga, Vicente Soler-Javaloyes, and Itahiza Domínguez Cerdeña. "Volcano monitoring with a multiparametric station placed inside a subhorizontal gallery in Tenerife (Canary Islands)". EGU General Assembly 2017, Vol. 19, EGU2017-13045; Viena, Austria.
- Natividad Luengo-Oroz, Pedro Torres-González, Itahiza Domínguez Cerdeña, **David Moure**, Víctor Villasante-Marcos, María Jiménez-Mejías, Carmen del Fresno, and Laura García-Cañada. "Geochemical and geophysical approach to the Tenerife (Canary Islands) anomalous seismic swarm on the 2nd October 2016". EGU General Assembly 2017, Vol. 19, EGU2017-13645; Viena, Austria.
- Shadia Awadallah Estévez, **David Moure**, Pedro Torres-González, Leopoldo Acosta Sánchez, and Itahiza Domínguez Cerdeña. "Development of a low cost and low power consumption system for monitoring CO₂ soil concentration in volcanic areas". EGU General Assembly 2017, Vol. 19, EGU2017-15109; Viena, Austria.
- Itahiza Domínguez Cerdeña, Víctor Villasante-Marcos, Stavros Meletlidis, Sergio Sainz-Maza, Rafael Abella, Pedro A. Torres, Nieves Sánchez, Natividad Luengo-Oroz, María José Blanco, Laura García-Cañada, Jorge Pereda de Pablo (1), Héctor Lamolda, **David Moure**, Carmen Del Fresno, Anthony Finizola, Alicia Felepto, and the Multiteide Working Team. "Multiteide Project: Multiparametric characterization of the activity of Teide-Pico Viejo volcanic system". EGU General Assembly 2017, Vol. 19, EGU2017-10675; Viena, Austria.

7.2 Referencias bibliográficas

[Abella, R., et al. 2012] R. Abella, J. Almendros, E. Carmona, R. Martin, IGN Volcanic Team. Deployment of a seismic array for volcano monitoring during the ongoing submarine eruption at El Hierro, Canary Islands. *EGU General Assembly* 2012, Vienna.

[Agrocabildo 2017] Disponible online: <http://www.agrocabildo.org> (26/022017).

[Aki K.; Koyanagi, R. 1981] Keiiti Aki, Robert Koyanagi. Deep volcanic tremor and magma ascent mechanism under Kilauea, Hawaii. *Journal of Geophysical Research* 1981, doi: 10.1029/JB086iB08p07095

[Akyildiz, I. F.; Vuran, M. C. 2010] Akyildiz, I.F. and Vuran, M.C., "Wireless Sensor Networks", ISBN 9780470515198, Advanced Texts in Communications and Networking, 2010, publisher John Wiley & Sons.

[Albu, R. et al., 2010] Roxana Albu, YannLabit, Gayraud Thierry, Berthou Pascal. An Energy-efficient Clock Synchronization Protocol for Wireless Sensor Networks. Cornell University Library. Networking and Internet Architecture. *The IEEE 22nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications*.

[Almendros 1999] Análisis de Señales Sismo-Volcánicas Mediante Técnicas de Array. Tesis Doctoral, Universidad de Granada.

[Almendros 2000] A double seismic antenna experiment at Teide Volcano: Existence of local seismicity and lack of evidences of volcanic tremor. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 2000. 103, pp. 439-462

[Arduino 2015] Arduino. Available online: <http://arduino.cc> (25 Feb 2015).

[Andronico, D. et al. 2008] Andronico, D.; Corsaro R.A.; Cristaldi, A.; Polacci, M. Characterizing high energy explosive eruptions at Stromboli volcano using multidisciplinary data: An example from the 9 January 2005 explosion. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 2008. 176, pp. 541-550

[Apache 2015] Apache. Available online: <http://httpd.apache.org/> (25/02 2015).

[Asten, M. W.; Henstridge, J. D. 1984] Array estimators and the use of microseisms for reconnaissance of sedimentary basins. *Geophysics*, vol. 49, pp. 1828–1837.

[BeagleBone 2013] URL: <http://beagleboard.org>.

[Bonaccorso, A. et al. 2004] Bonaccorso, A.; Campisi, O.; Falzone, G.; Gambino, S. Continuous Tilt Monitoring: Lesson Learned from 20 Years Experience at Mt. Etna. In *Mt. Etna: Volcano Laboratory* (eds A. Bonaccorso, S. Calvari, M. Coltelli, C. Del Negro and S. Falsaperla), American Geophysical Union, Washington, D. C. 2004. DOI: 10.1029/143GM19.

[Bonvalot, S. et al. 1998] Bonvalot, S.; Diament, M.; Gabalda, G. Continuous gravity recording with Scintrex CG-3M meters: a promising tool for monitoring active zones. *Geophysical Journal International* 1998. 135, 470-494.

[Bordoni, P. et al. 2007] Paola Bordoni, John Haines, Giseppa Di Giulio, Giuliano Milana, Paolo Augliera, Micele Cercato, Luca Martelli, Gabrizio Cara and the Cavola Experiment Team. Cavola experiment site: geophysical investigations and deployment of a dense seismic array on a landslide. *Anal. of Geophysics*, vol. 50, 5.

[Bormann et al. 2002] P. Bormann, E. R. Engdahl, R. Kind "Seismic Waves and Earth Models" chapter 2 of New Manual of Seismology Observatory Practice (NMSOP), Ed. Peter Bormann, GeoForschungsZentrum Potsdam, Germany. Vol 1, ISBN 3-9808780-0-7

[Capon et al. 1968] J. Capon, R.J. Greenfield, R. J. Kolker and R. T. Lacoss. Short-period signal processing results for the large aperture seismic array. *Geophysics*, vol 33, pp. 452-472.

[Chong, Kumar 2003] Chong, C.Y. and Kumar, S.P., Sensor networks: Evolution, Opportunities, and Challenges. in *Proc. of the IEEE*, vol. 91, pp.1247-1255, Aug. 2003.

[Chouet, A. 1996] Bernard A. Chouet. Long-period volcano seismicity: its source and use in eruption forecasting. *Nature* 380, 309-316 Mar 1996 doi: 10.1038/380309a0

[Chouet, B.A. et al. 1997] Bernard Chouet, Gilberto Saccorotti, Marcello Martini, Phillip Dawson, Gaetano de Luca, Giuliano Milana, Roberto Scarpa. Source and path effects in the wave fields of tremor and explosions at Stromboli Volcano, Italy. *Journal of Geophysical Research*, doi: 10.1029/97JB00953.

[ChungWu, Y. et al. 2011] Yik-Chung Wu, Chaudhari, Q., Serpedin, E., Clock Synchronization of Wireless Sensor Networks. *Signal Processing Magazine, IEEE*, vol.28, no.1, pp.124-138, Jan. 2011 doi: 10.1109/MSP.2010.938757

[Cooklev 2007] T. Cooklev, J. C. Eidson, L. Fellow, A. Pakdaman, An Implementation of IEEE 1588 Over IEEE 802.11b for Synchronization of Wireless Local Area Network Nodes, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol 56, no 5, October 2007.

[Corrado, G et al. 1981] Corrado, G.; Luongo, G. Ground deformation measurements in active volcanic areas using tide gauges. *Bulletin Volcanologique* 1981. 44, pp 505-511.

[CR800 2015] CR800. Available online: <https://www.campbellsci.com/cr800-datalogger> (accessed 25 Feb 2015)

[CTBTO 2013]. Comprehensive Test-Ban-Treaty Organization: www.ctbto.org

[Dargie, W.; Poellabauer, C. 2010] Fundamentals of Wireless Sensor Networks. John Wiley & Sons, pp. 7. ISBN 978-0-470-99765-9

[De la Cruz-Reyna 2010] Servando De la Cruz-Reina, Marta Tárrega, Ramón Ortiz, Alicia Martínez-Bringas. "Tectonic earthquakes triggering volcanic seismicity and eruptions. Case studies at Tungurahua and Popocatepetl volcanoes". *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 193. pp 37-48. March 2010.

[Del Rio 2011a] Joaquin del Rio, Daniel Mihai Toma, Shahram Shariat-Panahi, Antoni Manuel Lazaro Precision Time Synchronization of an Underwater Seismic System through IEEE-1588 ISPCS 2011 *International IEEE Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control, and Communication* September 14 - 16, 2011 München Munich, Germany

[Del Rio 2011b] Joaquín del Río, Daniel Toma, Shahram Shariat-Panahi, Antoni Mànuel, Helena Geirinhas Ramos. Precision Timing in Ocean Sensor Systems Measurement Science and Technology. IOP Publishing. Volume 23 Number 2 pp 025801-025807 December 2011

[Del Rio et al. 2013] Joaquin Del Rio, Daniel Toma, Shahram Shariat Panahi, Yves Auffret and Antoni Mànuel Lázaro IEEE Journal of Oceanic Engineering. Smart IEEE-1588 GPS Clock Emulator for Cabled Ocean Sensors. Aceptado pendiente de publicación.

[Dibble, R. R. et al. 2008] Dibble, R. R.; Kyle, P. R.; Rowe, C. A. Video and seismic observations of Strombolian eruptions at Erebus volcano, Antarctica. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 2008. 177, pp. 619-634.

[Domínguez et al. 2014] I. Domínguez Cerdeña, C. del Fresno, A. Gomis Moreno. "Seismicity Patterns Prior to the 2011 El Hierro eruption". *Bulletin of the seismological society of America*, Volume 104. Number 1. February 2014. doi: 10.1785/0120130200.

[Dzurisin, D. 2007] Dzurisin D. The modern volcanologist's tool kit. In *Volcano Deformation: New geodetic monitoring techniques*. Springer-Verlag, BerlinHeilderberg New York 2007, pp. 26-27. ISBN 3-540-42642-6

[Edison 2005]. C. Edison, "IEEE 1588 Basics," Proceedings of the 2005 Conferenceon IEEE 1588, 10-12 October 2005, Zurich.

[Eff-Darwitch, A. et al. 2008] Eff-Darwitch, A.; Grassing, O.; Fernández Torres, J. An Upper Limit to Ground Deformation in the Island of Tenerife, Canary Island, for the Period 1997-2006. *Pure and Applied Geophysics* 2008, 165(6): 1049-1070

[Eidson 2006] J.C.Eidson "Measurement, Control and Communication using IEEE 1588", Springer 2006

[El Wahabi, A. et al. 2007] El Wahabi, A.; van Ruymbeke, M.; Ducarme, B. Precursory signal of the last eruption of Mount Etna detected by continuous gravity observations. *Int. Center Earth Tides* 2007. BIM, 143, 11499-11506.

[Elson, J. et al. 2002] Jeremy Elson, Lewis Girod and Deborah Estrin. Fine-Grained Network Time Synchronization using Reference Broadcasts. Fifth Symposium on Operating Systems Design and Implementation 2002.

[Fertitta et al. 2010] Gioacchino Fertitta, Antonio Di Stefano, Giuseppe Fiscelli, Giuseppe C. Giaconia. A low power and high resolution data logger for submarine seismic monitoring. *Microprocessors and Microsystems*. Volume 34, Issues 2-4. Pp 63-72. March-June 2010.

[FenglinNiu 2011].Preface to Special Issue On Seismic Array Analysis and CEArray. Department of Earth Science, rice University, Houston. doi:10.1007/s11589-011-0763-9

[Folco, P et al. 2010] Folco, P.; De Natale, G.; Obrizzo, F.; Troise, C.; Capuano, P.; De Martino, P.; Tammaro, U. Ground deformation analysis at CampiFlegrei (Southern Italy) by CGPS and tide-gauge network 2010. *EGU General Assembly*, Viena, Austria, 2010; vol 12. EGU2010-11655.

[Fonseca, F. et al. 2003] Fonseca, F. B. D.; Bruno, V. E.; Faria, N. P. L.; Heleno, S. I. N.; Lazaro, C.; d'Orey, N. F.; Ferrerira, A. M. G.; Barros, I. J. M.; Santos, P.; Bandomo, Z.; Day, S. J.; Osorio, J. P.; Baio, M.; Matos, J. L. G. Multiparameter monitoring of Fogo Island, Cape Verde, For volcanic risk mitigation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 2003.125, pp 39-56

[Frankel et al. 1991] Frankel, A.; Hough, S.; Friberg, P.; Busby, R. Observations of Loma Preita aftershocks from a dense array in Sunnyvale, California. *Bulletin of the Seismological Society of America* 80 1900-1922

[Frosch and Green 1966] R.A. Frosch, P. E. Green. The Concept of a Large Aperture Seismic Array. *Proc. R. Soc. Lond. A*, vol 290, 1966

[Ganeriwal, S. et al. 2003] Saurabh Ganeriwal, Ram Kumar, Mani B. Srivastava. Timing-sync Protocol for Sensor Networks. *SenSys* 2003

[Ganeriwal, S. et al. 2005] Ganeriwal, S., Pöpper, C. Secure Time Synchronization Service for Sensor Networks. *ACM Trans. Inf. Syst. Secur* (2008). Doi: 10.1145/1380564.1380571

[García, L. G. 2009] Luis Javier García villalba, Ana Lucila Sandoval Orozco, Alicia Triviño Cabrera, Cláudia Jacy Barenco Abbas. Routing Protocols in Wireless Sensor Networks. *Sensors* 2009, 9 8399-8421.

[Gassner-Stamm, G. 2009] Gabriela Gassner-Stamm, Donat Fäh. Array-and H/V- measurements at NPP Leibstadt. Publicación interna del servicio sismológico suizo.

[GEOSS 2008] GEOSS, The Full Picture. Geneva, Switzerland, 2006, URL: <http://www.earthobservations.org>

[Gnuplot 2015] Gnuplot. Available online: <http://www.gnuplot.info> (accessed 25 Feb 2015).

[Goldstein, P.; Archuleta, R. J. 1978] Array Analysis of Seismic Signals. *Geophysical Research Letters*, vol. 14, pp. 13-16.

[Gottsmann, J. et al. 2004] Gottsmann, J.; Fournier, N.; Rymer, H. g_log4PDA: an application for continuous monitoring of gravity using LaCoste & Romberg Aliod 100 systems and Palm OS run hand-held computers. *Computers & Geosciences* 2004. 30, 553-558.

[Greco, T. et al. 2014] Greco F.; Iafolla, V.; Pistorio, A.; Fiorenza, E.; Currenti, G.; Napoli, R.; Bonaccorso, A.; Del Negro, C. Characterization of the response of spring-based relative gravimeters during paroxysmal eruptions at Etna volcano. *Earth, Planets and Space* 2014. 66:44.

[Green et al. 1966] Green, P.E., Kelly, E.J., Levin, M. J. A comparison of seismic array processing methods. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, vol 11, pp 67-84.

[Ibáñez, J.M. 2000] Jesús M. Ibáñez, Edoardo Del Pezzo, Javier Almendros, Mario La Rocca, Gerardo Alguacil, Ramón Ortiz and Alicia García. Sismovolcanic signals at Deception Island volcano, Antarctica: wave field analysis and source modeling. *Journal of Geophysical Research*, Vol 105. Pp 13905-13931. 2000

[Ibáñez et al. 2012] J. M. Ibáñez, E. Carmona. "Sismicidad volcánica". Instituto de Geofísica. Universidad de Granada. Campus de Cartuja s/n. 18071, Granada. http://www.uclm.es/profesorado/egcardenas/SISMICIDAD_VOLCANICA.pdf. Consultado el 28 de Enero de 2015.

[IEEE Std. 1588-2008] Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems, IEEE STD 1588-2008, IEEE Instrumentation and Measurement Society, TC-9, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, NY, 24 July 2008.

[IGN 2013] Instituto Geográfico Nacional: www.ign.es/ign/main/index.do

[Imagemagick 2015] Imagemagick. Available online: <http://www.imagemagick.org/> (accessed 25 Feb 2015).

[Jue Yang 2010] Design And Implementation of Large-Scale Wireless Sensor Networks for Environmental Monitoring Applications. PhD University of North Texas.

[Kleinman, J. W. et al. 1992] Kleinman, J. W.; Otway, P. M. Lake-level monitoring as a tool for studies of crustal deformation. *Monitoring Volcanoes: Techniques and Strategies Used by the Staff of the Cascades Volcano Observatory, 1980-90*. J.W. Ewert; D. A. Swanson. 1992, pp 159-174.

[Kumar et al. 2009] Satish Kumar, B. K. Sharma, Parkhi Sharma, M. A. Shamshi. 24 Bit seismic processor for analysing extra large dynamic range signals for early warnings. *Journal of scientific & industrial research*. Volume 68, Pp 372-378. May 2009.

[La Rocca et al. 1998] La Rocca, M., Petrosino, S., Saccorotti, G., Simini, G., Ibáñez, J.M., Almendros, J., Del Pezzo, E. Location of the source and shallow velocity model deduced from the explosion quakes recorded by two seismic antennas at Stromboli Volcano. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1998.

[Lacoss, R. T.; Kelly E. J. 1969] R. T. Lacoss, E. J. Kelly and M. N. Toksö. Estimation of seismic noise structure using arrays. *Geophysics*, vol. 34, pp. 21-36.

[Lahr et al. 1994] J.C. Lahr, B. A. Chouet, C. D. Stephens, J. A. Power, R. A. Page. Earthquake classification, location, and error analysis in a volcanic environment: implications for the magmatic system of the 1989-1990 eruptions at Redoubt Volcano, Alaska. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 62 (1994) 137-151.

[Liu et al. 2009] J. Yan; R. Liu. LabVIEW-based auto-timing counts virtual instrument system with ORTEC 974 Counter/Timer. *Nuclear Science and Techniques*. 20:307-311. 2009

[Libav 2015] Libav. Available online: <https://libav.org/> (accessed 25 Feb 2015).

[Lopattanakig 2011] Pakorn Lopattanakij, Pasakorn Tiwatthanont. Development of seismic data acquisition based on ARM-Linux. Conference on Electric information and control engineering (ICEICE), 2011. Pp 2117-2120. 15-17 April 2011.

[Matin, M. A.; Islam, M. M. 2012] M.A. Matin and M.M. Islam. Overview of Wireless Sensor Networks – Technology and Protocols. InTech, doi: 10.5772/49376.

[MarjaUski 1990] Event detection and location performance of the FINESA array in Finland. *Bulletin of the Seismological Society of America*.

[Maróti, M. et al. 2004] Miklós Maróti, Branislav Kusy, Gyula Simon, Ákos Lédeczi. The Flooding Time Synchronization Protocol. *SenSys* 2004

[Martínez, J. M. 1992] Optimización de parámetros de localización para distintos tipos de redes sísmicas. Aplicación a la Península Ibérica. Universidad Complutense de Madrid. Tesis doctoral.

[MC13193 Online] <http://www.nxp.com/products/no-longer-manufactured/2.4-ghz-low-power-transceiver-for-802.15.4:MC13193>

[McGuire, B. et al. 1995] B. McGuire, C.R.J.; Kilburn, J. Murray Monitoring active volcanoes. *UCL Press*. (1995)

[MICA2] <https://www.eol.ucar.edu/isf/facilities/isa/internal/CrossBow/DataSheets/mica2.pdf>

[Michel, C. 2010] Buchs Malbun Array Measurement Report. Publicación interna del Servicio Sismológico Suizo.

[Mills 1991] David L. Mills, 1991 Internet Time Synchronization: The Network Time Protocol. IEEE Transactions on Communications, vol. 39, 10.

[Montero, F. et al. 2012] Wireless Sensor Networks to Monitor Microclimate Variability for Precision Viticulture in Castilla La Mancha. *International Conference of Agricultural Engineering CIGR-Ageng2012*.

[Moure, D. et al. 2013] Moure, D.; Torres, P. Low power and high efficiency energy acquisition systems for volcano monitoring. *Proceedings of the 19 Symposium IMEKO TC 4*, Barcelona, Spain, July 18-19, 2013

[Moure, D. et al. 2016] David Moure, Pedro Torres. Data Acquisition System for Volcano Monitoring With Real-Time Transmission, Low cost and Low Power Consumption. *21th Symposium IMEKO TC4 Symposium and 19th IWADC Workshop*. September 7-9. 2016. Budapest Hungary

[NEM 2013] Nuclear Explosion Monitoring home page: <http://can-ndc.nrcan.gc.ca/index-eng.php>

[NMSOP-2 2012] New Manual of Seismological Observatory Practice. URL: <http://nmsop.gfz-potsdam.de>, 2012

[NORSAR 2013]. Norwegian Seismic Array: <http://www.norsardata.no/index.html>

[OTT LogoSense 2 2015] OTT LogoSense 2. Available online: <http://www.ott.com> (accessed 25 Feb 2015).

[Otway, P. M et al. 1989] Otway, P. M.; Vertical Deformation Monitoring by Periodic Water Level Observations, Lake Taupo, New Zealand. In *Volcanic Hazards*. John H. Latter. Springer Berlin Heidelberg 1989, Vol 1, pp 561-574.

[Pallarés 2013] O. Pallarés, J. Cadena, N. Carreras, D. Mihai-Toma, J. del Rio. Contribution to COBS synchronization with PTP IEEE std. 1588. OCEANS, 2013 IEEE 2013 June, Bergen (Norway) ISBN 978-1-4799-0000-8.

[Peltier, A, et al. 2011] Peltier, A.; Bachèlery, P.; Staudacher, T. Early detection of large eruptions at Piton de La Fournaise volcano (La Réunion Island): Contribution of a distant tiltmeter station. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 2011. 199 , pp 96-104.

[Petersen et al. 2008] Petersen S, B Myhre, Doyle P, Mikkelsen E, Carlsen S, Sjong D, Skavhaug A, Hendrik van der Linden J, and Sansom M. 2008a. A Survey of Wireless Technology for the Oil and Gas Industry. In *Proceedings of the SPE Intelligent Energy Conference and Exhibition*, Amsterdam, The Netherlands, February 25-27, 2008.

[Pezzo et al. 1993] Del Pezzo, E., S.; De Martino, S.; Gresta, M. Martini, G. Milana; d:Patané, C. Sabbarese. Velocity and spectral characteristics of the volcanic tremor at Etna deduced by a small seismomter array. *Journal of Geophysical Research*, 56, 1993

[Ping, S. 2003]. Delay Measurement Time Synchronization for Wireless Sensor Networks. Intel Research Berkeley Lab. URL: http://intel-research.net/Publications/Berkeley/081120031327_137.pdf.

[Prates et al. 2013] G Prates, A García, A Fernández-Ros, JM Marrero, R Ortiz, M Berrocoso. Enhancement of sub-daily positioning solutions for surface deformation surveillance at El Hierro volcano (Canary Islands, Spain). *Bulletin of volcanology*, vol. 75.

[Raspberry Pi 2013] URL: <http://www.raspberrypi.org>.

[Refraction 2015] Refraction Technology, Inc. <http://www.reftek.com> accessed (accessed 28/01/2015)

[Rhee 2009] Rhee, Ill-Keun; Lee, Jaehan; Kim, Jangsub; Serpedin, Erchin; Wu, Yik-Chung. 2009. Clock Synchronization in Wireless Sensor Networks: An Overview. *Sensors* 9, no. 1: 56-85.

[Saccorotti, G. et al. 2006] Gilberto Saccorotti, Bellina Di Lieto, Fabrizio Tronca, Costantino Fischione, Roberto Scarpa and Rosanna Muscente. Performance of the underground seismic array for the analysis of seismicity in Central Italy. *Annals of Geophysics*, vol. 49.

[Schmidt, R. O. 1986] Multiple emitter location and signal parameter estimation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol 34, pp. 276-280

[SED 2013] Swiss Seismological Service: http://www.seismo.ethz.ch/index_EN

[Shahzad, K. et al. 2008] Khurram Shahzad, Arshad Ali, N. D. Gohar. ETSP: An Energy-efficient Time Synchronization Protocol for Wireless Sensor Networks. 22nd International Conference on Advanced Information in Networking and Applications

[Shariat et al. 2008] Shahram Shariat Panahi, Antoni Mànuel, Francisco Alegria, Xavier Roset, Antoni Bermúdez, Valentí Sallares. Design, characterization and calibration of a short period ocean bottom seismometer (OBS). *Proc. I2MTC*, pp. 495-500, May 2008.

[Shariat et al. 2009] Shahram Shariat Panahi, Francisco Alegria, Antoni Mànuel Lázaro, Joaquín del Río. Time drift of ocean bottom seismometers (OBS). *XIX IMEKO World Congress*, Fundamental and applied metrology. 6-11 September 2009. ISBN 978-963-88410-0-1

[Song et al. 2009] Wen-Zhang Song, Renjie Huang, Ming Xu, Andy Ma, Behrooz Shirazi, Richard LaHusen. Air-dropped Sensor Network for Real-time High-fidelity Volcano Monitoring. *MobiSys '09 Proceedings of the 7th international conference on Mobile systems, applications, and services*.

[Stamm, G.; Burjanek, J. 2008] Array-measurements at the broadband-site "BOURR". Publicación interna del Servicio Sismológico Suizo.

[Szewczyk, R. et al. 2004] Robert Szewczyk, Joseph Polastre, Alan Mainwaring, David Culler. Lessons from a Sensor Network Expedition. *Wireless Sensor Networks*, Springer, pp 307 – 322. ISBN 978-3-540-20825-9

[Telegram-cli 2015] Telegram-cli. Available online: <https://github.com/vysheng/tg> (accessed 25 Feb 2015).

[Telegram Messenger 2015] Telegram Messenger. Available online: <https://telegram.org/> (accessed 25 Feb 2015).

[Tiwatthanont et al. 2001] Pasakorn Tiwatthanont, Pakorn Lopattanakij, Nathavuth Kitbutrawat, Jittiwut Suwatthikul, Udom Lewlomphaisarl. Flexible, adaptable and cost-effective seismometer with Linux-based embedded system: R-NON. SICE annual conference 2011. Pp 2182 - 2185. 13-18 September 2011.

[TMOTE 2013] URL: <http://www.eecs.harvard.edu/~konrad/projects/shimmer/references/tmote-sky-datasheet.pdf>

[Tridgell, A. 1999] Andrew Tridgell. Efficient Algorithms for Sorting and Synchronization. The Australian National University. Tesis Doctoral.

[Vegamet 381] Vegamet 381. Available online: <http://www.vega.com/en/3511> (accessed 25 Feb 2015).

[Werner-Allen 2005] Geoffrey Werner-Allen, Jeff Jhonson, Mario Ruiz, Jonathan Lees and Matt Welsh. Monitoring Volcanic Eruptions with a Wireless Sensor Network. Second European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN 05)

[Werner-Allen 2006] Geoff Werner-Allen, KonradLorincz, Jeff Johnson, Jonathan Lees and Matt Welsh. Fidelity and Yield in a Volcano Monitoring Sensor Network. *Proceedings of the 7th symposium on Operating systems design and implementation*, pp 381 – 396. ISBN: 1-931971-47-1

[Williams-Jones, G. et al. 2008] Williams-Jones, G.; Rymer, H.; Mauri, G.; Gottsmann, J.; Poland, M.; Carbone, D. Toward continous 4D microgravity monitoring of volcanoes: *Geophysics* 2008, 73.

[Wobschall, D. et al 2010] Darold Wobschall, Yuan Ma. Synchronization of Wireless Sensor Networks Using a Modified IEEE 1588 Protocol. Precision Clock Synchronization for Measurement Control and Communication (ISPCS), 2010 *International IEEE Symposium*.

[Worldsensing 2015] Fabricante del sistema Spidernano, para la detección sísmica. <http://www.spidernano.com> Consultado el 28 de enero de 2015.

[Zhu et al. 2009] Guowei Zhu, Huaixiu Wang. Research of intrinsic safe distributed 3-component seismic data acquisition system and its application. *9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI)*, 2009. Pp 4-413 – 4-416. 16 - 19 August 2009.

[Zobin 2012] Vyacheslav M. Zobin. Introduction to Volcanic Seismology. Ed. Elsevier Segunda edición 2012. Colima, México. ISBN 978-0-444-56375-0.

Anexo A. Componentes

Raspberry Pi Model B	
SoC	Broadcom BCM2835 (CPU,GPU,DSP,SDRAM,USB)
CPU	ARM 1176JZF-S 700MHz (ARM11)
Juego de instrucciones	RISC 32 bits
SDRAM	512 MiB
Puertos USB 2.0	2
Salida de video	HDMI,RCA,DSI
Almacenamiento	SD/MMC
Conectividad de red	10/100 Ethernet
Periféricos	GPIO,SPI,I2C,UART
Consumo	200 mA @ 12V

Tabla A.1. Características generales Raspberry Pi

La Coste & Romberg (Model G)	
Range	7000 mGal
Data Resolution	0.005 mGal
Accuracy	0.04 mGal
Repeatability	0.01 to 0.02 mGal
Drift	1.0 mGal per month
Length	19.7 cm
Width	17.8 cm
Height	25.1 cm
Weight	3.2 Kg

Tabla A.2. Características del gravímetro LaCoste & Romberg, Modelo G

Estación meteorológica	
Componente	Descripción
ATMEGA328	Microcontrolador
BMP085	Sensor de presión
SHT75	Sensor de humedad

Tabla A.3. Componentes principales de la estación meteorológica

Sensor Humedad			Sensor de Presión	
	Humedad	Temperatura	Presión	Temperatura
Resolución	12 bits	14 bits	0.01 hPa	0.1 °C
Exactitud	± 3 %RH	± 0.3 °C	± 0.2 hPa	± 0.5 °C
Repetitibilidad	± 0.1 %RH	± 0.1 °C	–	--
Rango	0 – 100 %RH	-40 – 123.8 °C	300 – 1100 hPa	-40 – 130 °C
Deriva	< 0.5 %RH/yr	< 0.04 °C/yr	±1 hPa/yr	--

Tabla A.4. Especificaciones de los sensores de humedad y presión

701-2 platformtilt meter	
Angular Range: lowgain	+8000 urad (+- 0.46 °)
Angular Range: highgain	+800 urad (+- 0.046 °)
Scale Factor	1 urad/mV
Resolution	0.1 urad
Linearity	2% of full span
Tilt Output	+8 V (single-ended) and +-16 V (differential)
Temperature Output	0.1 °C/mV (single-ended) and +-0.75°C accuracy

Tabla A.5. Especificaciones del inclinómetro de plataforma 701-2 de Jewell Instruments

SEBAPuls 30	
Precisión	+/- 3mm
Rango	0 – 35 m
Salida	4 – 20 mA

Tabla A.6. Características generales del radar SEBAPuls 30

Raspberry PI Camera Board	
Resolution	5 MP
Still Picture Resolution	2592 x 1944
Video	1080p @ 30fps, 720p @ 60fps and 640x480p 90fps
Interface	15-pin MIPI Camera Serial Interface
Size	20 x 25 x 9 mm

Tabla A.7. Especificaciones de la cámara para Raspberry Pi

GPS U-blox NEO-M8T	
Precisión temporal	≤ 20 ns (cielo despejado)
Frecuencia de salida	0.25Hz – 10 MHz
Fluctuación del pulso	± 11 ns
Resolución de la marca de tiempo	21 ns

Tabla A.8. *Características principales del receptor gps U-blox NEO-M8T*

MARK L-4C	
Frecuencia	$1,0 \pm 0,05$ Hz
Resistencia de la bobina	5500 Ω
Constante de transducción	7.02 V/in/s
Resistencia de amortiguamiento	8905 Ω
Inductancia de la bobina	6,05 H
Capacidad de la bobina	13,4 μ F
Masa	1000 g

Tabla A.9. *Características principales del sensor sísmico*

Anexo B. Esquemáticos

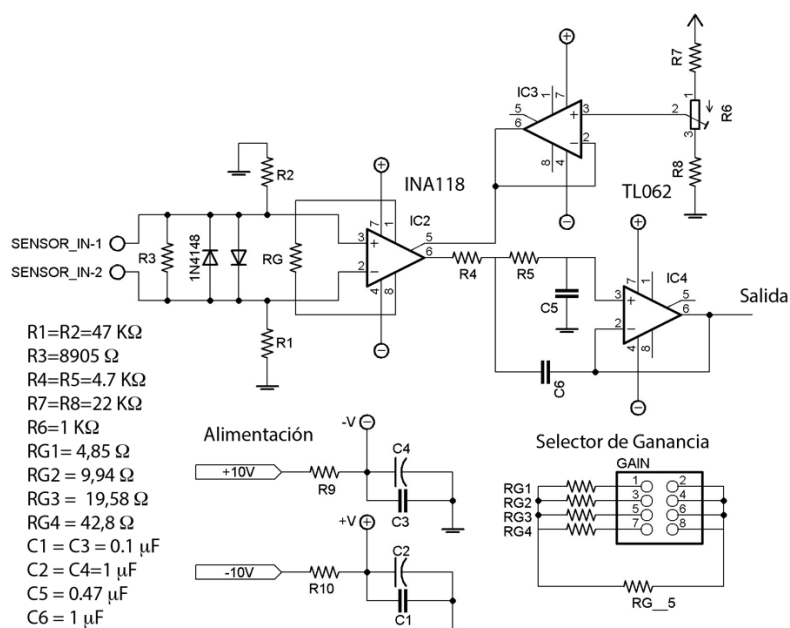


Figura B.1. Esquemático del sistema acondicionador de señal del sensor sísmico

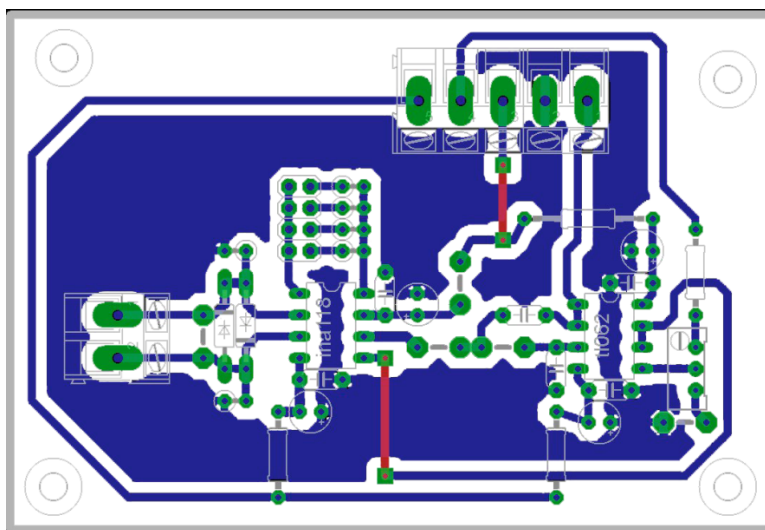


Figura B.2. PCB del sistema acondicionador de señal del sensor sísmico